

**Untersuchungen zur Einsatzmöglichkeit
von Doppelfassaden
bei hohen Verwaltungsbauten mit Glasfassaden
im extremgemäßigten Klimagebiet**

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Keonho Lee
aus Gyeongnam / Südkorea

Von der Fakultät VII – Architektur Umwelt Gesellschaft
der technischen Universität Berlin
zur Erlangen des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender :	Prof. Dr.-Ing. Peter Herrle Fachgebiet Architektur und Stadtentwicklung im globalen Zusammenhang, Fakultät VII, Architektur Umwelt Gesellschaft
Berichter :	Prof. Dipl.-Ing. Rainer Hascher, Fachgebiet Konstruktives Entwerfen und Klimagerechtes Bauen, Fakultät VII, Architektur Umwelt Gesellschaft
Berichter:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner, Hermann-Rietschel-Institut, Fakultät III, Prozesswissenschaft

Tag der wissenschaftlichen Aussprache : 16.Dezember 2002

Berlin 2002

D 83

Vorwort

Prof. Dipl.-Ing. Rainer Hascher und Prof. Dr.-Ing. Klaus Fitzner als meinen Doktorvätern danke ich herzlich. Mit großem Interesse und Anregungen haben sie meine Arbeit, sowohl wissenschaftlich als auch geistig, unterstützt, und mir eine Möglichkeit gegeben, mich sowohl persönlich als auch fachlich zu entwickeln. Ihre offenen Ohren waren für mich eine große Unterstützung.

Prof. Dr.-Ing. Peter Herrle danke ich für die Übernahme des Vorsitzes meines Promotionsverfahrens und die angenehme Durchführung der wissenschaftlichen Aussprache.

Während meines zwei jährigen Aufenthaltes am Hermann-Rietschel-Institut waren die Kollegen stets bereit, mit mir zu diskutieren und mir zu helfen. Sie standen immer mit Rat und Tat zur Seite. Dafür danke ich ihnen. Besonders danke ich Martin, Olaf, Frank und Frau Monika Reineck. Sie haben bei der Fertigstellung meiner Arbeit großzügig ihre Zeit für die Korrektur verwendet.

Bei Eungshin und Yongsang bedanke ich mich für ihre freundliche Bereitstellung, mir ihre fachlichen Kenntnisse weitergegeben zu haben.

Mein Dank gilt auch allen meinen Freunden und Familienangehörigen, die immer zu meiner Seite standen. Nicht zuletzt danke ich besonders meiner geliebten Frau Seonyeong, meiner Tochter Seun und meiner Mutter für ihre langjährige Begleitung und Unterstützung zum erfolgreichen Gelingen meiner Arbeit.

Berlin, Dezember 2002

Keonho Lee

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	X
Formelzeichen	XII
1 Aufgabenstellung	1
2 Derzeitiger Stand des klimagerechten Bauens	4
2.1 Einleitung	4
2.2 „Klimagerechtes“ und „ökologisches“ Bauen	4
2.2.1 Zwei unterschiedliche Philosophien	4
2.2.2 „klimagerechtes“ und „ökologisches“ Bauen	5
2.3 Gemäßigte Klimazone	7
2.3.1 Eigenschaften der gemäßigten Klimazone	7
2.3.2 Klima in Korea	7
2.3.3 Meteorologischer Vergleich der unterschiedlichen gemäßigten Klimata zwischen Seoul und Berlin	9
2.4 Hochhäuser	11
2.5 Zusammenfassung	13
3 Behaglichkeit und Energieverbrauch im Verwaltungsgebäude	14
3.1 Einleitung	14
3.2 Wärmeabgabe des Menschen	15
3.3 Einflussgrößen auf die Behaglichkeit	15
3.3.1 Lufttemperatur	15
3.3.2 Mittlere Temperatur der umgebenden Oberflächen – Wandoberflächentemperatur	16
3.3.3 Relative Raumluftheuchte	16
3.3.4 Luftbewegung	17
3.3.5 Kleidung	17
3.4 Bauphysikalische Kennzahlen	17
3.4.1 Wärmedurchgangszahl (k-Wert)	17
3.4.2 Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)	18
3.4.3 Tageslichtdurchlassgrad ((- Wert)	19
3.5 Energiehaushalt in Verwaltungsgebäuden	20
3.5.1 Heizen	20

Inhaltsverzeichnis

3.5.2 Kühlen	20
3.5.3 Beleuchten	21
3.3.4 Klimaanlage	21
3.6 Thermische Last im Verwaltungsgebäude	22
3.6.1 Sonnenstrahlung	22
3.6.2 Veränderung der Wärmeströme in Verwaltungsbauten während der letzten 5 Jahrzehnte.....	22
3.6.3 Thermische Grenze	23
3.7 Zusammenfassung	25
4 Strömungsphysikalische Grundlagen bei der natürlichen Belüftung	26
4.1 Einleitung	26
4.2 Gebäude	26
4.2.1 Strömung im Gebäude	26
4.2.2 Freie Gebäudelüftung	27
4.3 Raum	29
4.3.1 Strömung im Raum	29
4.3.2 Freie Raumlüftung	29
4.4 Zusammenfassung	31
5 Doppelfassade	33
5.1 Einleitung	33
5.2 Notwendigkeit der Fensterlüftung infolge SBS und TBS	33
5.3 Problematik der einschaligen Fassade	34
5.3.1 Allgemein	34
5.3.2 Glasarten	35
5.3.3 Position des Sonnenschutzes	36
5.3.4 Orientierung des Büros	37
5.4 Doppelfassade	37
5.4.1 Prinzip – Fassade mit Klima und Jahreszeit angepassten Einstellungsmöglichkeiten	37
5.4.2 Klassifikation	41
5.4.3 Jahreszeitliche Betrachtungsweise bei Doppelfassade	45
5.4.4 Grundlage zur Berechnung der Wärmebilanz der Doppelfassade	49
5.5 Einsatzgrenze der Doppelfassade	55
5.6 Zusammenfassung	55
6 Untersuchung von Beispielen	57
6.1 Einleitung	57

6.2 Klassifizierte Untersuchung von Beispielen	58
6.2.1 Typ1 – Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitzten an der Außenfassade	58
6.2.2 Typ2 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade	64
6.2.3 Typ3 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade	65
6.2.4 Typ4 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade	66
6.2.5 Typ5 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade	70
6.2.6 Typ6 – Sonderformen, wie mehrgeschossige Doppelfassade mit Schachteffekt	71
6.3 Beurteilung der projektbezogen untersuchten Fassadentypen	74
6.3.1 Typ1 – Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitzten an der Außenfassade	74
6.3.2 Typ2 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade	75
6.3.3 Typ3 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade	76
6.3.4 Typ4 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade	76
6.3.5 Typ5 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade	76
6.3.6 Typ6 – Sonderformen, wie mehrgeschossige Doppelfassade mit Schachteffekt	77
6.3.7 Fazit	78
6.4 Zusammenfassung	78
7 Dynamische Gebäudesimulation mit „Trnsys“	79
7.1 Einleitung	79
7.2 Bestimmung der Randbedingungen und Aufbau der Konstruktion	80
7.2.1 Physikalische Randbedingungen	80
7.2.2 Aufbau der Konstruktion des Referenzgebäudes	83
7.2.3 Auswahl der Verglasungstypen	84
7.3 Simulation mit ausschließlich mechanischer Lüftung	84
7.4 Simulation unter der Berücksichtigung von Fensterlüftung	86
7.4.1 Vergleich des Heiz- und Kühlbedarfes	86

Inhaltsverzeichnis

7.4.2 Dauer der möglichen Fensterlüftung bei West- und Südbüro -----	90
7.5 Ergebnisdiskussion -----	96
7.5.1 Raumlufttemperaturverlauf im Sommer und Zulufttemperaturverlauf im Winter beim Südbüro -----	96
7.5.2 Verlängerung der Fensterlüftung bei doppelschaligen Fassaden gegenüber einschaligen Fassaden -----	98
7.6 Zusammenfassung -----	99
8 Messergebnisanalyse -----	101
8.1 Einleitung -----	101
8.2 Beschreibung des Messmodellaufbaus bei Werner Lang -----	102
8.2.1 Allgemeine Beschreibung der Messverfahren -----	102
8.2.2 Konstruktiver Aufbau der Doppelfassade -----	103
8.3 Berechnung des sommerlichen g-Wertes -----	104
8.3.1 Berechnungsvoraussetzung für den Sommerfall -----	104
8.3.2 Messergebnis am 4. Juli um 15:00 Uhr für den Sommerfall -----	106
8.3.3 Bilanzierung der Wärmeübertragung im Sommer aus Messergebnissen -----	106
8.3.4 Vergleich des gesamten Energiedurchlasses im Sommer von ein- und doppelschaligen Fassaden -----	109
8.4 Bewertung der Zulufttemperatur im Winter aus dem Ergebnis -----	113
8.5 Zusammenfassung -----	113
9 Schlussbetrachtung -----	115
9.1 Einleitung -----	115
9.2 Einsatz der verschiedenen Fassaden -----	115
9.3 Problematik der derzeitig gebauten Doppelfassaden -----	118
9.4 Allgemeingültiges Problem bei Hochhaus mit Ganzglasfassaden – Grenzschichtproblem -----	120
9.5 Zusammenfassung -----	121
Literaturverzeichnis -----	123
Anhang -----	129
A Vergleich des Heiz- und Kühlbedarfes -----	129
A.1 Einschalige Fassade mit Innensonnenschutz -----	129
A.2 Einschalige Fassade mit Außensonnenschutz -----	130
A.3 Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungs- schlitzen an der Außenfassade (Typ 1) -----	131

Inhaltsverzeichnis

A.4 Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade (Typ 2) -----	132
A.5 Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade (Typ 5) -----	133
B Raumlufttemperaturverlauf ohne Kühlung im Sommer -----	134
C Zulufttemperaturverlauf im Winter -----	135
D Dauer der möglichen Fensterlüftung bei Ost- und Nordbüro -----	136
D.1 Zulufttemperatur zwischen 15-25°C -----	136
D.2 Zulufttemperatur zwischen 10-26°C -----	138
D.3 Zulufttemperatur zwischen 5-27°C -----	140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Design Mode nach <i>Ken Yeang</i> -----	6
Tabelle 2:	Vergleich der monatlichen mittleren Temperatur (°C) -----	9
Tabelle 3:	Vergleich der monatlichen mittleren Niederschläge (mm) -----	10
Tabelle 4:	Vergleich der monatlichen mittleren Luftfeuchtigkeit (%) -----	10
Tabelle 5:	Strahlungsdurchlässigkeit von Glasarten bei senkrechtem Strahlungseinfall -----	19
Tabelle 6:	Veränderung der Wärmeströme in Verwaltungsbauten von 1950-1995 -----	22
Tabelle 7:	Höhe der Zulüftung, Überströmung und Ablüftung -----	74
Tabelle 8:	Allgemeine Randbedingungsbestimmung für die Simulation -----	82
Tabelle 9:	Randbedingungsbestimmung für Doppelfassade -----	82
Tabelle 10:	Vergleich des monatlichen Heizbedarfes mit 2fachem mechanischen Luftwechsel -----	85
Tabelle 11:	Vergleich des monatlichen Kühlbedarfes mit 2fachem mechanischen Luftwechsel -----	85
Tabelle 12:	Vergleich des Heiz- und Kühlbedarfes mit 2fachem mechanischen Luftwechsel -----	85
Tabelle 13:	Vergleich des Heizbedarfes beim Südbüro -----	86
Tabelle 14:	Vergleich des Heizbedarfes beim Westbüro -----	86
Tabelle 15:	Vergleich des Kühlbedarfes beim Südbüro -----	87
Tabelle 16:	Vergleich des Kühlbedarfes beim Westbüro -----	87
Tabelle 17:	Vergleich des monatlichen Heizbedarfes -----	88
Tabelle 18:	Vergleich des monatlichen Kühlbedarfes -----	88
Tabelle 19:	Vergleich des Heiz- und Kühlbedarfes -----	89
Tabelle 20:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Südbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C (ganzzzeitig) -----	90
Tabelle 21:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Westbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C (ganzzzeitig) -----	90
Tabelle 22:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Südbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C (während der Arbeitszeit) -----	91
Tabelle 23:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Westbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C (während der Arbeitszeit) -----	91
Tabelle 24:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Südbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C (ganzzzeitig) -----	92
Tabelle 25:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Westbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C (ganzzzeitig) -----	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 26:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Südbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C (während der Arbeitszeit) -----	93
Tabelle 27:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Westbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C (während der Arbeitszeit) -----	93
Tabelle 28:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Südbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C (ganzzzeitig) -----	94
Tabelle 29:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Westbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C (ganzzzeitig) -----	94
Tabelle 30:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Südbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C (während der Arbeitszeit) -----	95
Tabelle 31:	Dauer der möglichen Fensterlüftung im Westbüro, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C (während der Arbeitszeit) -----	95
Tabelle 32:	Vergleich des Raumlufthemperaturverlaufes im Sommer bei Südbüros von 0:00 Uhr am 13. bis 24:00 Uhr am 15. August 1999 -----	96
Tabelle 33:	Vergleich des Zulufttemperaturverlaufes im Winter bei Südbüros von 0:00 Uhr am 15. bis 24:00 Uhr am 17. Januar 1999 -----	97
Tabelle 34:	Konstruktionsbeschreibung bei der Messung -----	103
Tabelle 35:	Messergebnis am am 4. Juli um 15:00 Uhr -----	106
Tabelle 36:	Einschalige Fassade mit Innensonnenschutz -----	109
Tabelle 37:	Einschalige Fassade mit Außensonnenschutz -----	110
Tabelle 38:	Doppelfassade mit als konstant angenommener Oberflächen-temperatur der Innenverglasung -----	111
Tabelle 39:	Doppelfassade mit realistisch annähernd angenommener Ober-flächentemperatur der Innenverglasung -----	111
Tabelle 40:	Vergleich des gesamten Energiedurchlasses -----	112
Tabelle 41:	Messergebnis an Wintertagen -----	113
Tabelle 42:	Variabler öffentbarer Anteil (%) der Außenfassade in Winter und Sommer zur gesamten Fassade -----	119
Tabelle A1:	Kühlhast bei einschaliger Fassade mit Innensonnenschutz -----	129
Tabelle A2:	Heizlast bei Einschaliger Fassade mit Innensonnenschutz -----	129
Tabelle A3:	Kühlhast bei Einschalige Fassade mit Außensonnenschutz -----	130
Tabelle A4:	Heizlast bei Einschaliger Fassade mit Außensonnenschutz -----	130
Tabelle A5:	Kühlhast bei Doppelfassade von Typ 1-----	131
Tabelle A6:	Heizlast bei Doppelfassade von Typ 1 -----	131
Tabelle A7:	Kühlhast bei Doppelfassade von Typ 2 -----	132
Tabelle A8:	Heizlast bei Doppelfassade von Typ 2 -----	132
Tabelle A9:	Kühlhast bei Doppelfassade von Typ 5 -----	133
Tabelle A10:	Heizlast bei Doppelfassade von Typ 5 -----	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle A11: Vergleich der operativen Raumlufthtemperatur beim Ostbüro -----	134
Tabelle A12: Vergleich der operativen Raumlufthtemperatur beim Westbüro -----	134
Tabelle A13: Vergleich der operativen Raumlufthtemperatur beim Nordbüro -----	134
Tabelle A14: Vergleich des Zulufttemperaturverlaufes im Winter beim Ostbüro ---	135
Tabelle A15: Vergleich des Zulufttemperaturverlaufes im Winter bei Westbüro ---	135
Tabelle A16: Vergleich des Zulufttemperaturverlaufes im Winter bei Nordbüro ----	135
Tabelle A17: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro ganzzzeitig, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C -----	136
Tabelle A18: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro ganzzzeitig, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C -----	136
Tabelle A19: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C -----	137
Tabelle A20: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C -----	137
Tabelle A21: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro ganzzzeitig, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C -----	138
Tabelle A22: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro ganzzzeitig, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C -----	138
Tabelle A23: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C -----	139
Tabelle A24: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C -----	139
Tabelle A25: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro ganzzzeitig, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C -----	140
Tabelle A26: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro ganzzzeitig, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C -----	140
Tabelle A27: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C -----	141
Tabelle A28: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C -----	141

Die Exel-Tabelle werden grafisch dargestellt, aber als Tabelle nummeriert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Monsun in Korea -----	8
Abbildung 2:	Wärmeabgabe des Menschen -----	15
Abbildung 3:	Verlauf der spektralen Transmission verschiedener Scheiben- dicken von Floatglas mit einem mittleren Gehalt von 0,1% Fe_2O_3 im Glas -----	19
Abbildung 4:	Grenzkurven der inneren Lasten für eine Überschreitung von 25° C in 10 % der Büroarbeitszeit -----	23
Abbildung 5:	Druckverteilung im Hochhaus -----	28
Abbildung 6:	Raumluftströmung bei Fensterlüftung -----	31
Abbildung 7:	Anteil der als „befindlichkeitsgestört“ eingestuft Personen in den untersuchten 15 Gebäuden in % -----	34
Abbildung 8:	Spektraler Verlauf der Transmission bei verschiedenen Fe_2O_3 Anteilen -----	35
Abbildung 9:	Prinzipieller Konstruktionsunterschied zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden -----	38
Abbildung 10:	Luftströmung bei Windstille ohne und mit der Sonnenein- strahlung -----	41
Abbildung 11:	Klassifizierung nach thermischer Auswirkung -----	43
Abbildung 12:	Winterlicher Strömungsvergleich zwischen ein- und doppel- schaligen Fassaden -----	46
Abbildung 13:	Einstellungsmöglichkeiten der verschiedenen Fassaden und Auswirkung im Winter -----	47
Abbildung 14:	Einstellungsmöglichkeiten der verschiedenen Fassaden und Auswirkung im Sommer -----	49
Abbildung 15:	Fassadendetail und –außenansicht von Objekt 1 -----	59
Abbildung 16:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 2 -----	60
Abbildung 17:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 3 -----	61
Abbildung 18:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 4 -----	62
Abbildung 19:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 5 -----	63
Abbildung 20:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 6 -----	64
Abbildung 21:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 7 -----	66
Abbildung 22:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 8 -----	67
Abbildung 23:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 9 -----	68
Abbildung 24:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 10 -----	69
Abbildung 25:	Westfassadendetail und –außenansicht von Objekt 11 -----	71
Abbildung 26:	Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 12 -----	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 27: Ansicht der Überströmungsöffnung und Strömungskonzept in Fassade von Objekt 13	73
Abbildung 28: Grundriss mit der doppelschaligen Fassade. Der Aufbau des Grundrisses mit der einschaligen Fassade erfolgt ohne D-Zone, wie D-Ost, D-West, W-Süd und S-Nord	83
Abbildung 29: Annahme des Temperaturgradienten des Messergebnisses	104
Abbildung 30: Anteil des Strahlungsdurchganges nach innen in %	105
Abbildung 31: Energiebilanz aus dem Messergebnis	108
Abbildung 32: Möglicher Nutzungsdauervergleich nach Jahreszeit und Büroorientierung in % in Folge der Bandbreite der Zulufttemperatur ----	117
Abbildung 33: Doppelfassade mit variabler Einstellung	120

Formelzeichen

Formelzeichen

Größe	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m ²
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² /s
a	Absorptionsgrad	-
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
α_{st}	Strahlungswärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
α_k	Konvektive Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
β	isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K
C	Strahlungskoeffizient	W/m ² K ⁴
c _p	spezifische Wärmekapazität der Luft	kJ/m ³ K
d	Schichtdicke	m
ε_i	korrigierter Emissionsgrad der inneren Oberfläche	-
f	Anteil der Verglasung an der Fassade	-
g	Fallbeschleunigung	m/s ²
g	g-Wert, Gesamtenergiedurchlassgrad	-
Gr	Grashof-Zahl	-
H	Höhe zwischen Zu- und Abluftöffnung	m
I	Sonnenstrahlungsintensität	W/m ²
K	Kennzahl für innere thermische Lasten	-
L	charakteristische Länge	m
Nu	Nusselt-Zahl	-
η	dynamische Viskosität	kg/ms
Pr	Prandtl-Zahl	-
Δp	Druckdifferenz	Pa
ρ	Dichte der Luft	kg/m ³
$\Delta \rho$	Dichtedifferenz	kg/m ³
\dot{Q}_{st}	Strahlungswärmestrom	W
\dot{Q}_k	konvektiver Wärmestrom	W
\dot{Q}	Kühlleistung	kW
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
q _i	sekundäre Wärmeabgabe nach innen	W/m ²
R	Wärmedurchgangswiderstand	m ² K/W
r	Reflexionsgrad	-

Formelzeichen

r	Rahmenanteil	-
T	absolute Temperatur	K
T_m	die mittlere absolute Temperatur im Raum	K
T_O	absolute Oberflächentemperatur	K
t	Temperatur	°C
t_a	Außenlufttemperatur	°C
t_O	Oberflächentemperatur	°C
t_L	Lufttemperatur	°C
t_∞	Temperatur der unbeeinflussten Umgebung	°C
ΔT	charakteristische Temperaturdifferenz	K
Δt	Temperaturdifferenz	°C
τ	Transmissionsgrad	-
ν	kinetische Viskosität	m ² /s
w	Luftgeschwindigkeit	m/s
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
z	Minderungsfaktor für Sonnenschutz	-

1 Aufgabenstellung

Durch das Zusammenwirken der verschiedenen klimatischen Elemente wie Lufttemperatur, Feuchte, Niederschlag, Sonnenstrahlung, Wind usw. entsteht das „Wetter“. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, wird es „Klima“ genannt. Diese Klimaelemente machen zusammen mit regionaler Geographie und Topographie jeweils ein typisches Klima aus.

Es wird heute von dem größten Teil der Klimaforscher als sicher angenommen, dass sich das Klima auf Grund des anthropogenen Treibhauseffekts global erwärmt. Es besteht ein Zusammenhang zwischen CO₂-Zunahme und der Klimaerwärmung der Erde [1]. Infolge der Erhöhung der CO₂-Anteile in der Atmosphäre reduziert sich die langwellige Rückstrahlung von der Erde in den Weltraum. Die Erde wird daher immer wärmer. Durch internationale Abkommen (z.B. Kyoto-Protokoll) wird deshalb versucht, die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Dazu können richtige Gebäudeentwürfe und Ausführungen erheblich beitragen.

Seit den ersten Hüttenbauten der Menschen haben klimatische Bedingungen in der Architektur immer eine wichtige Rolle gespielt. Während der gesamten Architekturgeschichte sorgten die Erbauer mit bewundernswerter Findigkeit für größtmöglichen Wohnkomfort innerhalb der lokalen klimatischen Anforderungen und Beschränkungen [2]. Regionale Architektur war daher immer die Konsequenz der klimatischen Bedingungen.

In DIN 50019 sind 4 Freiluftklimata in diversen Gebieten definiert [3]:

- Kaltes Klima :
Niedrigstes Monatsmittel unter –15 °C,
Grönland, Sibirien
- Gemäßigtes Klima :
Monatsmittel zwischen –15 °C und +25 °C,
Nord- und Mitteleuropa, Nordstaaten der USA
- Trockenes Klima :
höchstes Monatsmittel über 25 °C;
Nordafrika, Arabien, Südstaaten der USA
- Feuchtwarmes Klima :
Min. 1 Monatsmittel über 20 °C und 80 % rel. F.,
Indien, Mittelfrika, Amazonasgebiet

1 Aufgabenstellung

Die Klimazone, die in dieser Arbeit betrachtet wird, ist die gemäßigte Klimazone. Diese Klimazone wird durch einen Temperaturunterschied zwischen den Jahreszeiten von durchschnittlich 40 K charakterisiert. Nach dieser Einteilung gehören die mitteleuropäischen Länder nördlich der Alpen dazu. Zugleich gehört das Klima von Korea, woher der Verfasser kommt, und den angrenzenden Ländern, wie Japan und großen Teilen von China, im Prinzip zum gemäßigten Klima. Allerdings haben diese ostasiatischen Länder feuchtwarmes Klima im Hochsommer und kalttrockenes Klima im Winter. Es ist viel wärmer im Sommer und viel kälter im Winter, als in Mitteleuropa. Das Klima unterscheidet sich in diesem Punkt von dem europäischen gemäßigten Klima sehr deutlich. Daher wird dieses Klima als ein extremgemäßigtes Klima bezeichnet. Daraus folgt, dass die Bauweise in diesen Regionen anders als in Europa sein muss. Vor allem ökologisch anspruchsvolle und klimagerechte Bauten sind komplizierter zu realisieren.

In dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern unter Berücksichtigung der regionalen Klimabedingungen in koreanischen und ostasiatischen Großstädten die passive Nutzung von Solarenergie bei Hochhausplanungen vernünftig integriert werden kann. Dafür werden Beispiele aus Deutschland analysiert. In den 1970er Jahren wurden in Deutschland erste ernsthafte Schritte zur Energieeinsparung aus Anlass der damaligen Ölkrise durchgeführt und erste Bauwerke energieoptimiert realisiert. Um den Energieverbrauch im Gebäude zu senken, wurden in dieser Zeit verschiedene Konzepte wie Solar-, Öko-, und Niedrigenergiehäuser propagiert [4]. Die über 30-jährigen Erfahrungen im energiesparenden Bauen sind sehr umfangreich. Auch für „klimagerechte Hochhäuser“ werden hierzu umfangreiche Studien und Versuche durchgeführt. Seit 1990 werden passive Bauweisen auch in hohen gläsernen Verwaltungsbauten mit hohem technischen Aufwand integriert. Die Übertragung dieser technischen Entwicklung auf die extremgemäßigten Regionen in Ostasien, wie Korea, Japan oder China unter Berücksichtigung des regionalen Klimas wird in dieser Arbeit betrachtet.

Der Standort, auf den hier näher eingegangen wird, ist Korea. Koreanische Großstädte weisen i.A. eine hohe Bevölkerungsdichte auf, z. B. 17.145 Einwohner pro km² in Seoul im Jahr 1998. Dies ist auf die Flächenknappheit des Landes zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde und wird politisch und gesellschaftlich gefordert, dass die meisten Koreaner in Großstädten in Hochhäusern wohnen und arbeiten. Weil solche Hochhäuser immer häufiger mit einer Glasfassade aus ästhetischen Gründen ausgerüstet werden, ist diese Arbeit grundsätzlich auf die klimagerechten Maßnahmen bei der Hochhausplanung mit Glasfassaden in extremgemäßigten Klimagebieten ausgerichtet. Besonders werden dabei hohe Verwaltungsbauten betrachtet, zu deren Betrieb ein hoher Energieaufwand

1 Aufgabenstellung

notwendig ist. Ein solch hohes Gebäude kann ein enormes Energieeinsparpotenzial aufweisen. Eine Möglichkeit, den Energiebedarf zu reduzieren, ist die Ausführung einer Doppelfassade.

Die energetische Untersuchung von Glasfassaden in der Ausführung als Doppelfassade unter den oben genannten klimatischen Bedingungen in Ostasien ist daher der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Vertieft werden die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Doppelfassaden in diesem extremengemäßigten Klimagebiet untersucht. Ausgeschlossen bleiben aber Überlegungen zur Übertragbarkeit der gebäudetechnischen Entwicklung in Deutschland auf Korea.

2 Derzeitiger Stand des klimagerechten Bauens

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird der derzeitige Stand des klimagerechten Bauens besprochen. Als erstes werden die Begriffe „ökologisches“ und „klimagerechtes“ Bauen definiert und beide Bauweisen miteinander verglichen. Als nächstes werden die unterschiedlichen Klimazonen betrachtet. Insbesondere werden die Unterschiede der gemäßigten Klimazonen zwischen Korea und Deutschland am Beispiel zweier Städte aus beiden Regionen näher betrachtet und unter meteorologischen Gesichtspunkten miteinander verglichen. Am Schluss werden die Unterschiede zwischen der Bauweise von Hochhäusern in Korea und Deutschland herausgearbeitet. Dabei werden hauptsächlich hohe Verwaltungsbauten unter Berücksichtigung der Arbeitsanforderungen bei unterschiedlicher passiver Bauweise betrachtet.

2.2 „Klimagerechtes“ und „ökologisches“ Bauen

2.2.1 Zwei unterschiedliche Philosophien

Beim Entwurf umweltverträglicher Gebäude treffen zwei unterschiedliche Anschauungen aufeinander. Sie spiegeln zwei gegensätzliche philosophische Ansätze zum Schutz des Planeten wider [2].

Einerseits wird versucht, die Umwelt nur mit radikaler Veränderung der sozialen und kulturellen Werte zu retten. In dieser Anschauung ist Wirtschaftswachstum und hoher Lebensstandard keine Grundlage für Reichtum und Wohlergehen. Die Familie und die Gemeinschaft haben Vorrang vor dem Individuum. Die Gruppe dieser Haltung ist daher gegen den Kapitalismus und den freien Markt.

Eine andere Richtung versucht, die Umwelt technisch zu retten. Der Ansatz ist, dass nur die Anwendung von geeigneten Technologien eine ökologische Katastrophe, die durch die Menschen ausgelöst wird, vermeiden kann. Nur dadurch können Probleme, wie Umweltverschmutzung oder Ressourcenknappheit, bewältigt werden.

Während sich die erste Gruppe wenig mit der tatsächlichen Realität beschäftigt, behandelt die zweite Gruppe die Problematik nach Auffassung des Verfassers realistischer. Sie versucht mit Technik und Wissenschaft das Problem innovativ zu lösen.

2.2.2 „klimagerechtes“ und „ökologisches“ Bauen

Manchmal werden die beiden Begriffe „klimagerechtes“ und „ökologisches“ Bauen undifferenziert eingesetzt. Hier wird versucht, die Begriffe zu differenzieren, um Eindeutigkeit herzustellen.

Klimagerechtes Bauen

Hierbei handelt es sich hauptsächlich um einen Planungsprozess mit dem Konzept, für das Beheizen und das Kühlen des Gebäudes so wenig Primärenergie, die aus fossilen Brennstoffen stammt, wie möglich zu verwenden. Außerdem soll durch Nutzung alternativer Energien, die in den regionalen Klimaregionen unterschiedlich bereitgestellt werden, der Nutzerkomfort ebenfalls gewährleistet werden. Zu diesen Umweltenergien gehören neben Wasser vor allem Sonne, Wind und nachwachsende Brennstoffe.

Das Prinzip „energetisch nachhaltig zu bauen“ unterscheidet sich von „konventionell“ und „ökologisch“ konzipierten Gebäuden. Der Unterschied zum „ökologischen Bauen“ besteht hauptsächlich darin, dass nicht der gesamte Lebenszyklus von Entstehung bis zur Entsorgung der Gebäude, sondern nur der energetische Betriebshaushalt betrachtet wird. Es soll nicht mehr verwendet werden, wie nachwächst.

Ökologisches Bauen

Konzeptionell, aus energetischen und materiellen Aspekten betrachtet, ist das Hauptziel des „ökologischen Bauens“,

$$\text{Input} = \text{Output}$$

innerhalb der Biosphäre zu realisieren.

Gegenüber dem Begriff des „klimagerechten Bauens“ verfolgt das „ökologische Bauen“ einen noch komplizierteren und ganzheitlicheren Ansatz. Im Grunde basiert dieser Ansatz auf Wechselbeziehungen und -wirkungen in der Biosphäre. Der Zusammenhang aller Aktivitäten von Mensch und Natur ist die entscheidende Betrachtungsweise beim „ökologischen Bauen“. Gebäude und Siedlungen werden durch einen haushälterischen Umgang mit natürlichen Ressourcen umweltfreundlich und energiesparend errichtet. Dies bedeutet, passive und aktive Nutzung von Sonnenenergie und Anwendung von Materialien, die bei Herstellung, Gebrauch und

Entsorgung die „freien Güter Wasser, Boden und Luft möglichst wenig schädigen [5]. Daher müssen alle gebauten Systeme engere Beziehungen mit ihrer regionalen Umwelt und umgebenden Biosphäre haben. Aus diesem Grund liegt dem „ökologischen Bauen“ ein umfangreicher und komplizierter Ansatz als „klimagerechtes Bauen“ zugrunde.

	Konventioneller Ansatz	Klimagerechter Ansatz	Ökologischer Ansatz
Bauformeinfluss	andere Aspekte	Klima beeinflusst	Umwelt beeinflusst
Orientierung	rel. unwichtig	entscheidend	entscheidend
Fassade	andere Aspekte	klimaaktiv	umweltaktiv
Energiequelle	technisch erzeugt	technisch erzeugt / aus Umgebung	technisch erzeugt / aus Umgebung / lokal
Energieverluste	rel. unwichtig	entscheidend	entscheidend / recyclebar
Prinzip der Gebäuderegelung	elektromechanisch	elektromechanisch / manuell	elektromechanisch / manuell
	künstlich	künstlich / natürlich	künstlich / natürlich
Komfortlevel	konstant	variabel / konstant	variabel / konstant
Methode zur Low-Energie	elektromechanisch	passiv / elektromechanisch	passiv / elektromechanisch
Energieverbrauch	generell hoch	niedrig	niedrig
Materialquelle	rel. unwichtig	rel. unwichtig	wichtig
Materialoutput	rel. unwichtig	rel. unwichtig	wiederverwendbar
Ökologie	rel. unwichtig	wichtig	entscheidend

Tabelle 1: Design Mode nach *Ken Yeang*, Quelle [6]

Die Tabelle 1 zeigt, wie sich die Parameter bei der jeweiligen Bauweise voneinander unterscheiden. Zwei wesentlich unterschiedliche Aspekte zwischen „klimagerechtem“ und „ökologischem“ Bauen können so deutlich gemacht werden. Während die Bauformen beim „klimagerechten“ Bauen durch das Klima beeinflusst werden, ist beim „ökologischen“ Bauen die ganze Umwelt der Beeinflussungsfaktor. Während das eingesetzte Bau-Material beim „ökologischen Bauen“ eine entscheidende Rolle spielt, ist es beim „klimagerechten Bauen“ von geringerer Bedeutung.

2.3 Gemäßigte Klimazone

2.3.1 Eigenschaft der gemäßigten Klimazone

Das Klima spielte immer eine große Rolle bei der Entwicklung der regionalen Architektur. In heißen Regionen muss verhindert werden, dass direkte Sonnenstrahlung in das Gebäude eindringt. Außerdem wird die thermische Speicherfähigkeit von Massivbauten ausgenutzt, um die Tageshitze abzuhalten, zu speichern und nachts, wenn es kühler ist, wieder freizusetzen. In kalten Regionen spielen die isolierenden Eigenschaften von Materialien eine wichtige Rolle. Schutz vor kalten Winden spielt eine zusätzliche Rolle.

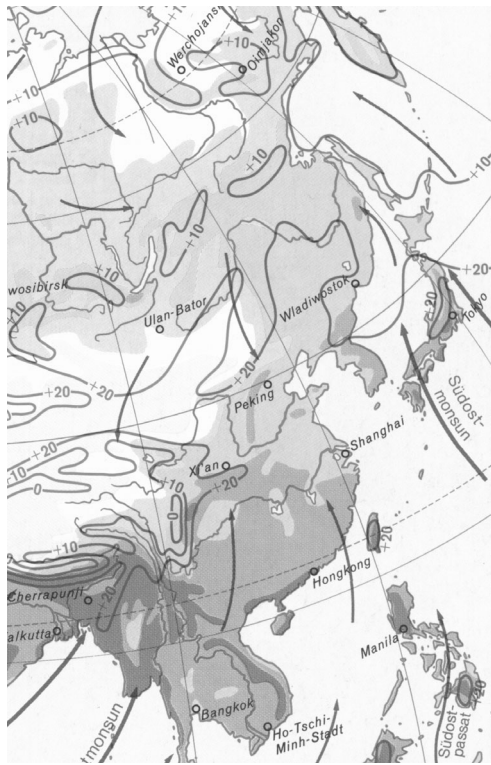
Während die beiden extremen Klimazonen (heiß oder kalt) auf einseitige ortsklimaspezifische Planungsmaßnahmen orientiert sind, bedürfen die Bauten in gemäßigten Klimazonen allgemein kompliziertere ambivalente Maßnahmen. Im Sommer z.B. muss das Gebäude vor der Tageshitze und der Sonnenstrahlung geschützt werden, obwohl im Winter Sonnenstrahlung und damit Energie maximal in den Innenraum gelangen soll.

2.3.2 Klima in Korea

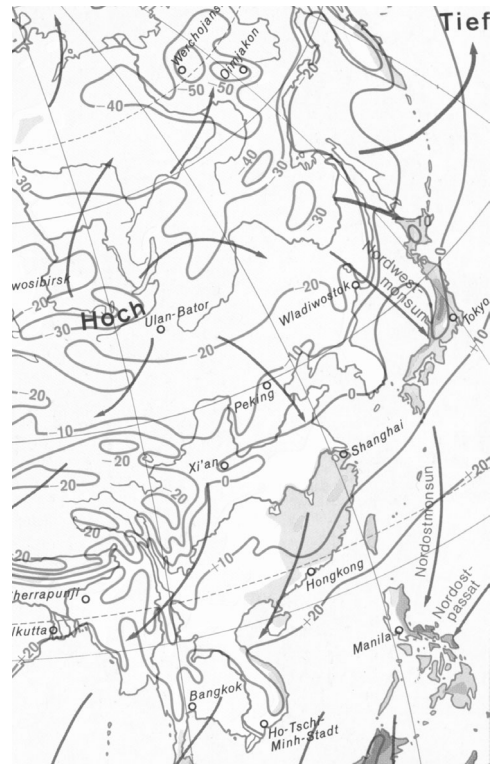
Korea liegt in der gemäßigten Klimazone. Folgende Klimafaktoren in Korea sind dominierend [7];

- hohe durchschnittliche Jahrestemperaturunterschiede
(in Korea 22 – 44 K, in Mitteleuropa ca. 19 K)
- mittlere bis geringe Tagestemperaturunterschiede
(in Korea 8 – 14 K, in M.E. ca. 7 K)
- mittlere bis hohe relative Luftfeuchte
(in Korea, im Sommer ca. 80 % r. F., im Winter ca. 65 % r. F., in M.E. 60 – 80 % r. F.)
- mittlere bis niedrige Niederschlagsmengen
(in Korea im Süden ca. 1160 mm, in M.E. ca. 800 – 1000 mm pro Jahr)

Da Korea im Norden an der Grenze zur kalten Klimazone liegt und im Süden an die subtropische Klimazone angrenzt und zugleich ein Übergangsgebiet vom kontinentalen Klima Innerasiens zum maritimen Klima darstellt, gibt es deutliche Klimaunterschiede zwischen den Jahreszeiten, besonders zwischen Sommer und Winter.



Südostmonsun, von Juni bis August



Nordwestmonsun, von Dez. bis Februar

Abbildung 1: Monsun in Korea, Quelle [8]

Sommer

Das maritime Klima herrscht von April bis September. Insbesondere von Juni bis August dringen feuchtwarme Luft und Hitze aus dem Südosten in das ganze Land. In dieser Zeit fallen die meisten Niederschläge des Jahres (40 – 60 %). Diese heftige Regenzeit ist von äußerst kurzer Dauer. Von Juli bis September erreichen orkanartige Wirbelstürme (Taifune) das Land und bringen heftige Regenfälle. In bestimmten Gebieten fällt an einem Tag über 300 mm Regen. Das ist etwa 1/4 der Niederschlagsmenge des ganzen Jahres. Es existiert im Sommer eine hohe durchschnittliche Luftfeuchtigkeit von 75 – 90 % r. F.. Die Lufttemperatur ist sehr hoch. Sie sinkt während der Nacht nur minimal. Dadurch wird die Verdunstung von Flüssigkeit an der Hautoberfläche verhindert, und es kann zum Hitzekollaps kommen. Im Sommer muss daher bei der Gebäudeplanung berücksichtigt werden, unbehagliche Luftzustände infolge hoher Lufttemperatur und hoher Luftfeuchtigkeit zu vermeiden.

Winter

Im Winter herrscht kontinentales Klima. In den Monaten von November bis März kommen die kalt-trockenen Winde vom sibirischen Festland im Nordwesten. In den

meisten Gebieten Koreas fallen die Temperaturen unter den Nullpunkt. Infolge des kalten Klimas, das durch das Kontinentalklima des Festlands bestimmt wird, ist es in Korea im Winter viel kälter als in anderen Ländern der gleichen geographischen Breite auf der Nordhalbkugel. In Seoul (37° 34' N) beträgt die durchschnittliche Temperatur im Januar nur –3,5 °C dagegen in San Francisco (37° 37' N) über 10 °C. Im Mitteleuropa ist im Winter die relative Luftfeuchte sehr hoch (80-95%), in Korea ist sie niedrig. Durch das trockene Wetter mit den niedrigen Temperaturen kommt es oft zu Dürren am Ende des Winters. Im Winter ist Schutz vor Kälte und Wind aus dem Nordwesten erforderlich. Abgesehen davon, sollte die passive Nutzung der winterlichen Sonnenstrahlung optimiert werden.

2.3.3 Meteorologischer Vergleich der unterschiedlichen gemäßigten Klimata von Seoul und Berlin.

Der meteorologische Vergleich der regionalen Klimata von Seoul und Berlin weist einen wesentlichen Unterschied auf, obwohl beide Städten zur gemäßigten Klimazone gehören.

Monatliche Temperatur

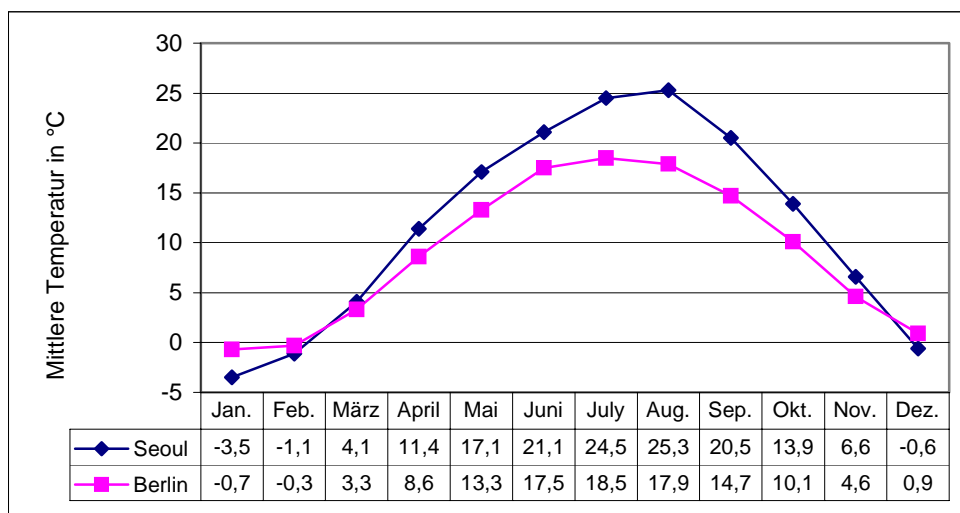


Tabelle 2: Vergleich der mittleren monatlichen Temperatur (°C), Quelle [3], [9]

Im Januar ist es in Seoul um 2,8 °C kälter als Berlin. Im Frühling, schon ab März, liegt die monatliche Temperatur in Seoul höher als in Berlin. Im Hochsommer beträgt der Höchsttemperaturunterschied zwischen Seoul und Berlin ca. 7,4 K. Während die mittlere höchste Monatstemperatur im Sommer in Berlin 18,5 °C im Juli erreicht, erreicht sie in Seoul 25,3 °C im August. Bis November ist es in Seoul wärmer als in

Berlin. Ab Dezember fällt die Temperatur wieder stark ab, und es wird in Seoul kälter als in Berlin, wie in Tabelle 2 dargestellt.

Monatliche Niederschläge

In Berlin fallen die monatliche Niederschläge ganzjährig gleichmäßig niedrig aus. In Seoul ist es anders. Im Winter ist die Situation wie in Berlin. Im Sommer (Juli) aber erreicht die monatliche Niederschlagsmenge in Seoul 380 mm. Das entspricht der sechsfachen Menge an Regen, die in Berlin niedergeht. (vergleiche Tabelle 3)

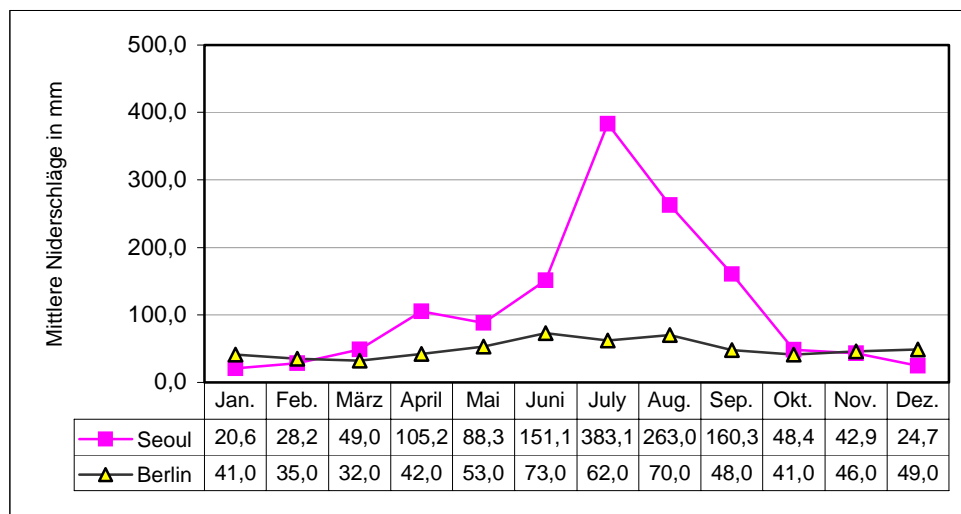


Tabelle 3: Vergleich der monatlichen mittleren Niederschläge (mm), Quelle [3], [9]

Luftfeuchtigkeit

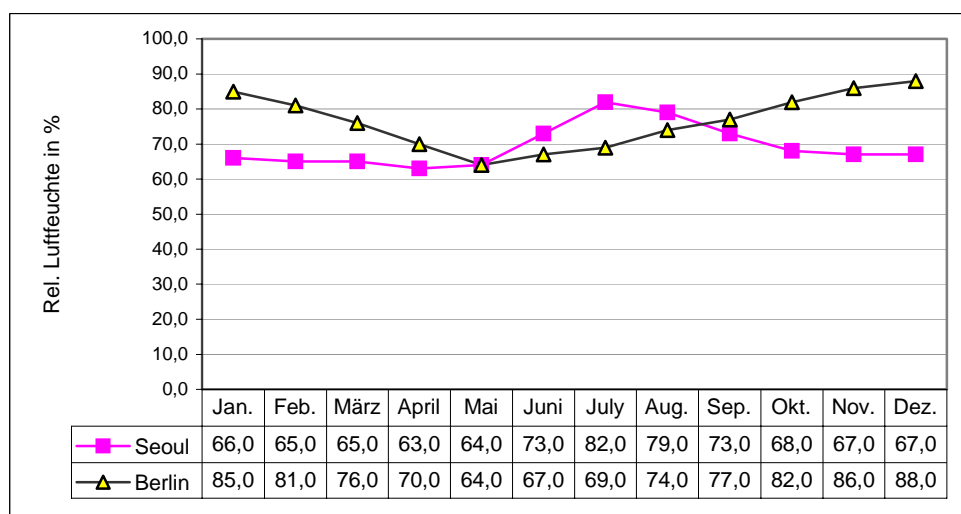


Tabelle 4: Vergleich der monatlichen mittleren relativen Luftfeuchtigkeit (%), Quelle [3], [9]

Die hohe sommerliche Niederschlagsmenge während der Regenzeit geht mit einer hohen Luftfeuchtigkeit ein. Diese erreicht im Monatsmittel in Seoul 82 % r. F. gegenüber 69 % r. F. in Berlin. Die Situation kehrt sich im Winter um. Die winterliche Feuchtigkeit im Dezember in Berlin beträgt bis 88 % r. F., aber in Seoul nur 66 % r. F.. (vergleiche Tabelle 4)

Fazit

Berlin (Nördliche Breite 52°) liegt geografisch nördlicher als Seoul (NB 37°). Insgesamt zeigt das Klima von beiden Städten deutliche Unterschiede, sowohl im Winter als auch im Sommer. Im Winter ist Seoul noch kälter als Berlin und im Sommer ist es in Seoul wärmer und feuchter. Insbesondere wegen dieses feuchten Sommers mit hohen Temperaturen ist der Einsatz von Klimaanlage in Seoul notwendig und sinnvoll. Diese Anlagen müssen zu einem früheren Zeitpunkt eingeschaltet werden als in Berlin. Das betrifft besonders die Verwaltungsbauten, in denen die internen Wärmelasten sehr hoch sind. In Bürobauten in Seoul ist es daher kaum denkbar, ohne eine Klimaanlage einen angemessenen Arbeitskomfort bereitzustellen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Klima in Seoul insgesamt extremer ist als in Berlin. Aus diesem Grund ist es unsinnig zu versuchen, Klimaanlage in Seoul bei der Gebäudeplanung einzusparen, im Gegensatz zu Berlin. Ohne mechanische Unterstützung ist es unmöglich, die Behaglichkeitskriterien, wie Raumlufttemperatur zwischen +22 °C und max. + 27 °C und zulässige Feuchte zwischen 35 und 65 % r. F., zu erfüllen.

2.4 Hochhäuser

Unter einem Hochhaus versteht man ein sehr hohes Gebäude mit einer verglichen mit den Geschossflächen kleinen Grundfläche. Ein derartiges Gebäude hat meistens eine sehr große Geschosszahl und eine große Fassadenfläche auf einer kleinen Grundfläche.

Hochhäuser kommen vor allem in amerikanischen und ostasiatischen Großstädten, wie New York, Chicago, Seoul, Shanghai, Tokio, Kuala Lumpur, aber auch in europäischen Metropolen wie Frankfurt am Main, London usw. vor. Diese Tendenz „hoch zu bauen“ breitet sich derzeit ohne regionale Grenze aus. Sie wird jetzt auch in vielen deutschen Städten, wie Düsseldorf oder Berlin, beobachtet. Hochhäuser

haben meistens eine symbolische Rolle. „Hoch zu bauen“ ist daher keine besonders seltene Bauform mehr.

Inzwischen sind durch diesen Trend unterschiedliche Probleme entstanden. Ein Hauptproblem ist der hohe Energieverbrauch, bezogen auf die kleine Grundfläche und hohen technischen Aufwand. Bei alten „Wolkenkratzern“ z. B. in New York und Chicago können die Fenster geöffnet werden, wodurch eine natürliche Belüftung ermöglicht wird. Dadurch kann zum Teil der Energieverbrauch im Gebäude reduziert werden. Lange Zeit waren die Pfosten-Riegel-Konstruktion ohne öffenbare Fenster bei Hochhäusern dominant. Das Raumklima kann dort nur mechanisch geregelt werden, so dass der damit verbundene Energieverbrauch im Vergleich zu den vorherigen Konstruktion erheblich größer ist. Es ist allgemein bekannt, dass ein Fenster, das geöffnet werden kann, die Mindestforderung für die natürliche Belüftung erfüllt, damit auch eine passive Bauweise darstellt, um die Klimaunterschiede zwischen innen und außen nutzbar zu machen. Daraus ergibt sich eine potenzielle Energieeinsparmöglichkeit bei diesen Bauten.

Bei vielen deutschen Projekten wird seit mehreren Jahren ernsthaft versucht, Hochhäuser in klimagerechter Bauweise zu errichten. Ausgehend vom Anspruch der natürlichen Belüftung von Hochhäusern und unter Einbeziehung weiterer ökologischer Aspekte wurden in den letzten Jahren verschiedene Hochhäuser konzipiert. Sehr viele solcher Hochhäuser sind inzwischen realisiert bzw. noch in der Bauphase. Manche Projekte, wie die Commerzbankzentrale in Frankfurt am Main oder die RWE-Hauptverwaltung in Essen, sind weltweit bekannt. Trotzdem müssen die Ansprüche als nicht erfüllt und einige dieser Konzepte leider als „Mode“ bezeichnet werden. Gleichwohl sind derartige Ansätze weiterhin in optimierter Form zu verfolgen. Immerhin haben diese Gebäude energetisch Verbesserung gegenüber ähnlichen alten Gebäuden ergeben. Allerdings hat dabei die Verbesserung der elektrischen Beleuchtung einen großen Beitrag geleistet.

Seit Mitte der 90er Jahre wurden viele Projekte mit unterschiedlichen Konzepten gebaut. Sie wurden als „ökologische Hochhäuser“ bezeichnet und durch die Medien populär gemacht. Betrachtet man solche Projekte aber näher, ist es häufig der Fall, dass die Bauweise mit „ökologischem Bauen“ wenig zu tun hat. Ein „ökologisch konzipiertes“ Hochhaus sollte eine Harmonie zwischen Natur und menschlichen Bedürfnissen gewährleisten [10]. Häufig handelt es sich lediglich um die Integration klimagerechter Energiesparkonzepte.

2.5 Zusammenfassung

Wenn ein Hochhaus in der Innenstadt mit einem passiven Energiekonzept realisiert werden soll, ist die Umsetzung sehr komplex. Da ein Hochhaus auf einer kleinen Grundfläche gebaut wird, sind „ökologische“ oder „klimagerechte“ Konzepte schwer realisierbar. In dieser Arbeit werden vor allem Aspekte des „klimagerechten“ Bauens betrachtet. Es wird im Folgenden besonders darauf eingegangen, wie Fassaden bei der passiven Bauweise eine wichtige Rolle zur Energieeinsparung spielen können.

3 Behaglichkeit und Energieverbrauch im Verwaltungsgebäude

3.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird über die Behaglichkeit, den Energieverbrauch und die Wärmelast von Verwaltungsgebäude geschrieben.

Im ersten Teil wird die Wärmeabgabe des Menschen betrachtet und dabei speziell auf die Beziehung zwischen Wärmeabgabe des Menschen und der Temperaturdifferenz zu seiner Umgebung näher eingegangen.

Danach werden die Grundanforderungen für Behaglichkeit an Temperatur, Feuchte, Strahlung und Luftgeschwindigkeit usw., die keine unabhängigen Kenngrößen sind, sondern zueinander in enger Beziehung stehen, aufgezeigt. Obwohl allgemeine Angaben in deutschen DIN-Normen stehen, ist die Behaglichkeit von vielen Einflüssen abhängig.

Im 3. Teil werden die Kenngrößen, die bauphysikalisch eine wichtige Rolle spielen, behandelt. Entsprechend den Änderungen von Jahreszeit, Tageszeit und Witterung sollte die Gebäudehülle variabel gestaltet sein, um die Aufgaben des winter- und sommerlichen Wärmeschutzes, der Tageslichtnutzung und des Luftaustausch usw., energetisch optimiert erfüllen zu können. Zu den entsprechenden allgemeinen Kennwerten zur Quantifizierung dieser funktionalen Eigenschaften von Fassaden gehören k -, g -, τ -Werte usw..

Viertens wird der Energiehaushalt eines Verwaltungsgebäudes differenzierter betrachtet. Zu diesem Thema gehören Heizen, Kühlen, Beleuchten und Klimatisieren.

Zum Schluss wird die innere- und äußere thermische Last eines Verwaltungsgebäudes behandelt. Dabei wird die geschichtliche Veränderung der thermischen Last betrachtet.

3.2 Wärmeabgabe des Menschen

Die zentrale Körpertemperatur beim normalen Menschen liegt zwischen 36,6 und 37 °C. Beim Stoffwechsel des Menschen wird Wärme erzeugt, die wieder an die Umgebung abgegeben wird. Die Abgabe von Wärme erfolgt fühlbar und latent. Zur fühlbaren Wärmeabgabe gehört die durch Konvektion und Strahlung abgegebene Wärme. Die latente Wärmeabgabe erfolgt durch Verdunstung von Wasser über die Haut. Durch eine aufwendige Regelung der Wärmeabgabe wird die für die Organe erforderliche Körpertemperatur in einem engen Bereich konstant gehalten.

Ein sehr interessantes Ergebnis zeigt Abbildung 2. Zwischen 18 und 30 °C Lufttemperatur beträgt die Gesamtwärmeabgabe von Menschen rund 118 W ohne große Abweichung. Unter 18 °C Lufttemperatur steigt die Wärmeabgabe deutlich. Während die fühlbare Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion mit dieser sinkenden Temperatur weiter steigt, bleibt die latente Wärmeabgabe durch die Feuchtigkeitsabgabe konstant. Mit steigender Temperatur über 30 °C sinkt die fühlbare Wärmeabgabe, und die latente Wärmeabgabe steigt. Bei einer Temperatur höher als 34 °C ist die fühlbare Wärmeabgabe null. Bei dieser Temperatur findet nur latente Wärmeabgabe statt.

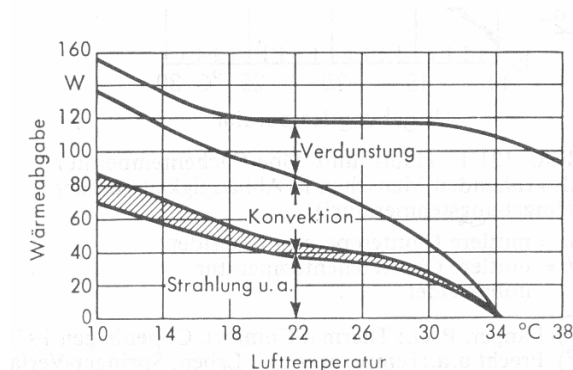


Abbildung 2: Wärmeabgabe des Menschen, Quelle [3]

3.3 Einflussgrößen auf die Behaglichkeit

3.3.1 Lufttemperatur

Bei normal gekleideten, sitzenden Menschen ohne körperliche Arbeit ist im Winter eine operative Temperatur von 22 °C behaglich. Im Sommer ist eine operative Temperatur von 22 bis 24 °C am günstigsten. Die höhere Temperatur im Sommer ist

zu erlauben, da der Mensch im Sommer im allgemeinen leichter bekleidet ist. Für den unbedeckten Menschen wird 28 °C als optimale Temperatur angegeben.

In DIN-Normen und VDI-Richtlinien ist der Behaglichkeitsbereich für die operative Temperatur zwischen +20 °C und max. + 25 °C angegeben. Im Sommer werden Werte bis max. + 27 °C als gerade noch akzeptabel eingestuft. Wegen dieser Vorgaben werden Lufttemperaturen auch noch bis +18 °C als behaglich empfunden, wenn die innere Wandoberflächentemperatur und die relative Raumluft-feuchte entsprechend hoch sind, und eine operative Temperatur von mindestens 20°C erreicht wird.

3.3.2 Mittlere Temperatur der umgebenden Oberflächen – Wandtemperatur

Die mittlere Temperatur der umgebenden Flächen ist einschließlich der Heizflächen in einem Raum die sogenannte mittlere Strahlungstemperatur t_r , sehr wesentlich für die Entwärmung des menschlichen Körper und damit seine Behaglichkeit. Dieser Wert ergibt sich nach folgender Gleichung (1).

$$t_r = \frac{\sum(A \times t)}{\sum A} \quad (1)$$

A : einzelne Fläche, wie Wände, Heizkörper, Fenster usw. in m²
t : deren Temperatur in °C

Die mittlere Oberflächentemperatur sollte sich nach Möglichkeit nicht um mehr als 2 – 3 K von der Raumlufttemperatur unterscheiden, wenn man mit den Mittelwerten rechnen will. Sonst können die Unterschiede größer sein – die Asymmetrie ist dann zu beachten.

3.3.3 Relative Raumluftfeuchte

Der Mensch kann die Raumluftfeuchte nicht unmittelbar wahrnehmen. Bei der normalen Raumtemperatur von 20 °C spielt allerdings die Wärmeabgabe durch Verdunstung nur eine geringe Rolle. Es ist daher anzunehmen, dass auch die Luftfeuchte in diesem Bereich keinen großen Einfluss hat. Bei steigender Temperatur und Feuchte wird der Wasserdampfgehalt der Luft zugleich mit dem Wärmegefühl erfasst. In der Klimatechnik liegen die Behaglichkeitsgrenzen der zulässigen Feuchte zwischen 35 und 65 % r. F..

3.3.4 Luftbewegung

Die Luftbewegung hat einen erheblichen Einfluss auf die Behaglichkeit. Während eine mäßige Luftbewegungen bei dem Menschen im Freien als nicht unangenehm empfunden wird, reagiert er in geschlossenen Räumen empfindlicher auf jede Luftbewegung. Für den Wärme- und Stofftransport ist eine Mindestluftbewegung aber immer erforderlich. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die Luftgeschwindigkeit in Räumen den Wert 0,15 m/s niemals überschreitet. Sonst steigt die Zugerscheinungsgefahr.

3.3.5 Kleidung

Die Kleidung hat ebenfalls einen großen Einfluss bei der Behaglichkeit. Sie spielt insofern eine Rolle, dass sie den Wärmeübergang beeinflusst. Der Isolationswert einer Kleidung ist in DIN 33403, T.3 beschrieben. Als physikalische Einheit für den Wärmeleitwiderstand gilt folgendes.

$$R_{\lambda} = 1(\text{m}^2\text{K})/\text{kW} \quad \text{oder} \quad I_{\text{clo}} = 155(\text{m}^2\text{K})/\text{kW} \quad (2)$$

Heute sind die Wärmeleitzahlen der Textilien besser als früher. Die Kleidung schützt daher besser als früher. Für die Bürotätigkeit hat sich ein clo-Wert von 0,6 bis 0,8 allgemein durchgesetzt.

3.4 Bauphysikalische Kennzahlen

3.4.1 Wärmedurchgangszahl (k-Wert)

Gemäß DIN 4108-3 gibt die Wärmedurchgangszahl den Wärmedurchgang von Außenwandkonstruktionen in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ an [11]. Sie wird mit folgender Gleichung ermittelt.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}} = \frac{1}{R} \quad \text{in } \text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (3)$$

- | | | |
|------------|---|----------------------------------------------------------------------|
| α_i | : | innerer Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ |
| α_a | : | äußerer Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ |
| d | : | Schichtdicke in m |
| λ | : | Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{mK})$ |

R : Wärmedurchgangswiderstand in (m²K)/W

Typische Werte für heutige Isolierglasscheiben liegen bei 1,4 W/m²K, wobei Gläser mit speziellen Edelgasfüllungen, wie Argon oder Krypton, Werte bis zu 1,1 W/m²K und sogar noch darunter erreichen können.

3.4.2 Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)

Gemäß DIN EN 410 gibt der dimensionslose Gesamtenergiedurchlassgrad an, welcher Anteil der auf eine transparente oder transluzente Außenwandkonstruktion auftreffende Sonnenstrahlung in den Raum gelangt [12]. Bei der Bestimmung des g-Wertes steht der Wellenlängenbereich $\lambda = 300 - 2500$ nm im Vordergrund.

Die Sonnenstrahlung mit der Intensität I wird teils ungehindert hindurchgelassen (τ : Transmissionsgrad), teils reflektiert (r : Reflektionsgrad), und teils vom Glas absorbiert (a : Absorptionsgrad). Der Zusammenhang zwischen den drei Anteilen ist, dass die Summen von $\tau + r + a$ immer 1 ist. Die absorbierte Wärme wird über die langwellige Strahlung oder Konvektion an die Luft teils nach außen und teils nach innen als sekundäre Wärme, die von der Lage der Verglasung, Windgeschwindigkeit, Innen- und Außentemperaturen und außerdem von den Temperaturen der Glasoberflächen abhängig ist, abgegeben. Die Ermittlung von dieser q_i ist eine aufwendige Aufgabe. Bei DIN EN 410 wurde die Auswirkung von Sonnenschutz nicht berücksichtigt. Der DIN EN 13363-1 kann zur Ermittlung des g-Wertes mit einer Sonnenschutzvorrichtung verwendet werden [13].

Sekundäre Wärmeabgabe nach innen beträgt z. B. bei einer Einfachverglasung :

$$q_i \approx a \times \frac{\alpha_{\text{innen}}}{\alpha_{\text{außen}} + \alpha_{\text{innen}}} \quad (4)$$

$\alpha_{\text{außen}}$: Wärmeübergangskoeffizient außen 23 W/(m²K)

α_{innen} : Wärmeübergangskoeffizient innen $(3,6 + \frac{4,4 \times \epsilon_i}{0,837})$ W/(m²K)

q_i : der korrigierte Emissionsgrad der inneren Oberfläche,
bei Glas ($i = 0,837$)

Hier ergibt sich die kurz- und langwellige Strahlungsbilanz aus der Summe von Transmissionsgrad und sekundärer Abgabe q_i der absorbierten Wärme an der inneren Scheibe. Das ist der gesamte g-Wert.

g-Wert :

$$g = \tau + q_i \quad (5)$$

Die g- Werte heutiger Isolierverglasungen liegen in der Regel zwischen 60 und 80 %. Dieser Wert kann stark verändert werden, weil er von der Wellenlänge der Strahlung, der Geometrie, der Orientierung, dem Einfallswinkel und der Zusammensetzung des Glases usw. abhängig ist. Tabelle 5 zeigt, dass verschiedene Glasarten bei senkrechtem Strahlungseinfall unterschiedliche Gesamt g-Wert haben können.

Glasarten	Scheibendicke in mm	Gesamtenergie- durchlassgrad g in %	Mittl. Temperaturerhöhung über Luft in °C
Klarglas, einfach	2,8	87	11
Absorptionsglas	5,6	52	36
Reflexionsglas	5,6	46	14
Isolierverglasung, 2fach	11,4	79	19
Isolierverglasung, 3fach	17,9	70	21

Tabelle 5: Strahlungsdurchlässigkeit von Glasarten
bei senkrechtem Strahlungseinfall, Quelle [3]

3.4.3 Tageslichtdurchlassgrad (τ - Wert)

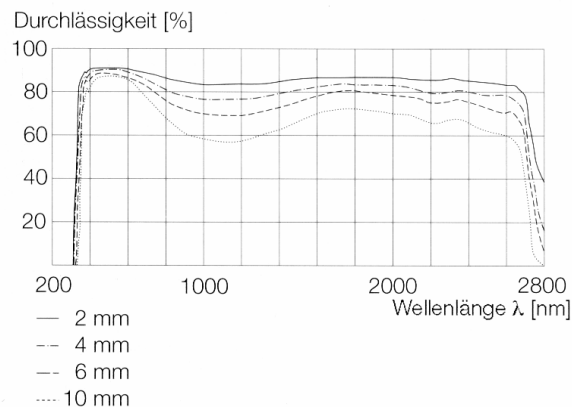


Abbildung 3: Verlauf der spektralen Transmission verschiedener Scheibendicken von Floatglas mit einem mittleren Gehalt von 0,1% Fe₂O₃ im Glas, Quelle [14]

Gemäß DIN EN 410 gibt der Tageslichtdurchlassgrad oder die Lichtdurchlässigkeit den direkt durchgelassenen sichtbaren Strahlungsanteil im Wellenlängenbereich λ von 380 bis 780 nm an. Dieser Prozentsatz wird unter anderen von der Glasdicke beeinflusst. Abbildung 3 zeigt das Transmissionsverhältnis von verschiedenen

Scheibendicken des Glases. Ein typischer τ -Wert für heutige Isolierverglasungen liegt bei etwa 70 %.

3.5 Energiehaushalt des Verwaltungsgebäudes

3.5.1 Heizen

Der Energieverbrauch zur Erwärmung der Raumluft in Gebäuden beträgt etwa 35 % des gesamten Endenergieverbrauchs in der BRD. Beim Energieverbrauch zum Heizen geht es um die Deckung von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten. Die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz ergeben sich aus der DIN 4108 und der Wärmeschutzverordnung (WschVO 1995) bzw. Energieeinsparverordnung EnEV 2002.

Bei allen Gebäudearten resultieren Wärmegewinne aus externen und internen Wärmequellen. Während der Wärmegewinn aus der Sonnenstrahlung unabhängig von der Nutzungsart anzusetzen ist, sind die internen Wärmequellen, wie z. B. Bürogeräte und künstliche Beleuchtung im Verwaltungsbau größer als beim Wohnungsbau. Der Energieverbrauch für die Heizung beträgt bei heutigen Verwaltungsgebäuden im Durchschnitt 80 bis 150 kWh/m² [15]. Bei gut gedämmten Verwaltungsgebäuden z. B. mit k-Wert von 0,5 W/m²K liegt der Wärmeverbrauch zum Heizen bei -10°C Außentemperatur nur noch bei 15 W/m². Bei 0 °C wird die Bilanz durch interne Wärmegewinne bereits ausgeglichen. Aus diesem Grund spielt der Energiebedarf für die Heizung in gut wärmedämmten neuen Bürobauten keine große Rolle [16].

3.5.2 Kühlen.

„Kühllast“ bedeutet die kalorische Leistung, die zu einem bestimmten Zeitpunkt über die Raumluft aus dem Raum abgeführt werden muss, um vorgegebene Luftzustandswerte einzuhalten [17]. Die Kühllast eines Verwaltungsgebäudes besteht daher aus den äußeren Lasten, vor allem der Sonnenstrahlung, und inneren Lasten. Außerdem muss die Außenluft aufbereitet werden, was im Sommer eine Kühlleistung erfordert. Der Energieaufwand für die Kühlung beträgt bei Bürogebäude in Deutschland 10 bis 15% des gesamten Aufwandes. Die Kühllast wird nach VDI 2078 berechnet. Während der kalten Jahreszeit sind die internen Wärmequellen zur Verringerung des Heizenergiebedarfs vorteilhaft. Aber sie führen gleichzeitig in der wärmeren Jahreszeit zu einer Erhöhung des Energieverbrauches zum Kühlen.

3.5.3 Beleuchten

Für Kunstlicht wird etwa 10 % des Stromverbrauchs der BRD aufgewendet [18]. Die Gestaltung der Fassade spielt eine sehr wichtige Rolle für diesen Energieverbrauch. Durch bessere Tageslichtnutzung lässt sich der Verbrauch stets reduzieren. So liegt dieser Wert bei einer Einschaltdauer von 60 % der gesamten Betriebszeiten etwa bei $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [19]. Er lässt sich um $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bei Gebäuden mit 30 % Verglasungsanteil und $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bei Gebäuden mit 80 % Verglasungsanteil senken, wenn die Tageslichtnutzung und eine optimale Regelung der Beleuchtung gegeben werden [15]. Um den Einsatz des Kunstlichtes, verbunden mit erhöhtem Stromverbrauch und Kühllasterhöhung, zu minimieren, ist eine integrierte Planung zur energetischen Optimierung unentbehrlich. Dadurch kann die Tageslichtnutzung optimiert werden, um den Energieaufwand zu reduzieren.

3.5.4 Klimaanlage

Eine Klimaanlage soll Temperatur und Feuchte der Luft im Raum innerhalb vorgeschriebener Grenzen konstant halten. Dazu werden 4 thermodynamische Luftbehandlungen, wie Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten, geregelt [3]. Der Energiebedarf für eine Klimatisierung vom Verwaltungsbau schwankt je nach der Art und dem Betreiben der raumluftechnischen Anlagen.

Man unterscheidet bei RLT-Anlagen zwischen Teilklimaanlage und Klimaanlage. Es bestehen deutliche Unterschiede zwischen diesen Anlagen. RLT-Anlage ist der Oberbegriff aller Lüftungsanlage, also auch eine, die lediglich den lufthygienisch notwendigen Luftwechsel sicherstellen kann. Eine Teilklimaanlage kann die zugeführte Luft zusätzlich temperieren und entfeuchten. Eine Klimaanlage kann dagegen die zugeführte Luft sowohl temperieren als auch filtern und befeuchten. Weil eine solche technische Anlage sehr große Energie verbraucht, kann das Energiesparpotenzial entsprechend groß sein.

Ein Beispiel für die einzelnen Anteile bei einer optimierten Anlage wird in [20] wiedergegeben. Der Energieverbrauch für Ventilatoren beträgt $14,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Das bedeutet ca. $1/3$ des gesamten Strombedarfs von $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der Energiebedarf für die Zuluftbehandlung beträgt $34 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und ca. 29 % des Gesamtenergiebedarfs von $116,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für Brauchwasser, Heizen und Kühlen.

3.6 Thermische Last im Verwaltungsgebäude

3.6.1 Sonnenstrahlung

Die Sonnenstrahlung ist für den Energiehaushalt eines Gebäudes von besonderer Bedeutung, da sie eine zusätzliche, allerdings sehr unbeständige Wärmequelle darstellt. Im Winter ist infolge des niedrigen Sonnenstandes trotz kurzer Sonnenscheindauer der Wärmegewinn durch die Fenster erheblich. Vor allem bei Neubauten als Passivhäuser mit Wärmeschutzgläsern wird die Heizlast während der Strahlungszeit dadurch problemlos gedeckt und man muss eher an Zusatzmaßnahmen gegen Überwärmung denken. Aber auch in Altbauten mit großen Fenstern kann bereits im März oder April die Sonnenstrahlung den Wärmebedarf eines Raumes decken. Andererseits belastet die Sonnenstrahlung im Sommer das Gebäude erheblich, da sie für die Kühlung von Räumen einen großen Teil des Energiebedarfes verursacht. Außerdem werden derzeit für viele Gebäude immer häufiger Ganzglasfassaden gebaut. Durch diese großen Glasflächen steigt einerseits der Wärmeverlust im Winter bei bedecktem Himmel und in der Nacht, andererseits erhöht sich die Sonneneinstrahlung sowohl im Winter als auch im Sommer. Durch eine Wärmeschutzverglasung mit $k = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ oder kleiner lassen sich heute auch bei größeren Glasflächen die Anforderungen der Wärmeschutzverordnung erfüllen. Um ganzjährig die Sonnenstrahlung optimal nutzen zu können, ist daher ein beweglicher Sonnenschutz notwendig.

3.6.2 Veränderung der Wärmeströme in Verwaltungsbauten während der letzten 5 Jahrzehnte

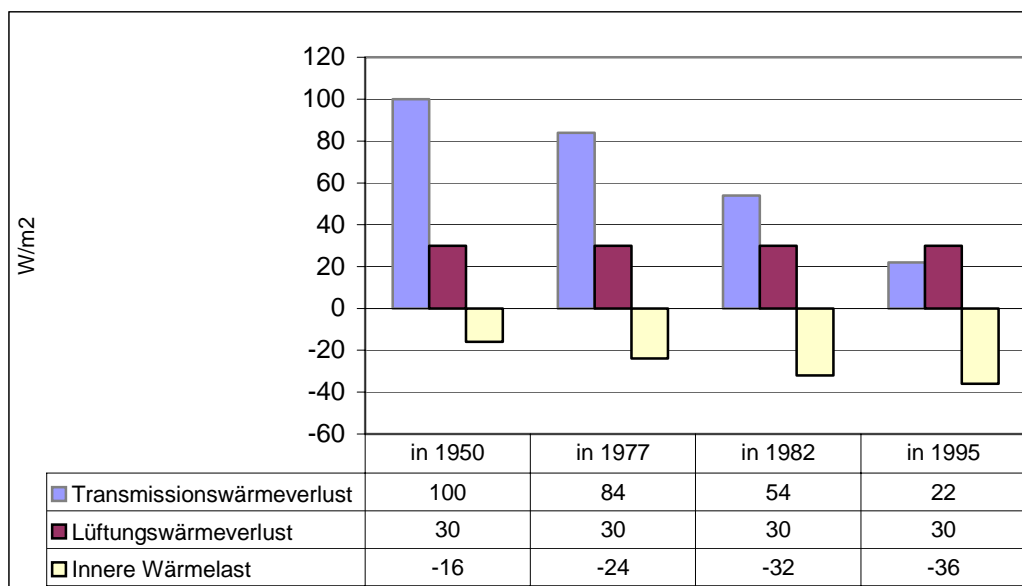


Tabelle 6: Veränderung der Wärmeströme in Verwaltungsbauten von 1950 – 1995, Quelle [21]

Im letzten halben Jahrhundert haben sich die durchschnittlichen Wärmeströme von Verwaltungsgebäuden drastisch verändert. Dies zeigt Tabelle 6. Nach dieser Tabelle war im Jahr 1950 der gesamte Wärmeverlust mit 130 W/m^2 viel größer als die interne Wärmelast von 16 W/m^2 . Dies hat sich in den letzten Jahren dramatisch geändert. Das Messergebnis aus dem Jahr 1995 zeigt, dass die Wärmeverluste von 130 W/m^2 auf 52 W/m^2 infolge des verbesserten Wärmeschutzes beim Gebäude reduziert werden, dagegen die interne Wärmelast von 16 W/m^2 auf 36 W/m^2 gestiegen ist.

3.6.3 Thermische Grenze

Während die Beheizung eines Gebäudes mit heutigen rechnergestützten Standards unproblematisch ist, spielt der sommerliche Wärmeschutz eine größere Rolle für die Gebäudetechnik. Die thermischen Lasten beeinflussen stark die Raumtemperaturen im Gebäude. In Verwaltungsbauten soll die Raumtemperatur 25°C bei maximal 10 % der Arbeitszeit nicht überschritten werden [22]. Damit sind die thermischen Lasten nach oben einzugrenzen.

Die Kühllast eines Gebäudes ergibt sich aus den äußeren Lasten, und den inneren Lasten. Die Höhe der Strahlungslast hängt vom Glasflächenanteil der Fassade und vom Sonnenschutz ab.

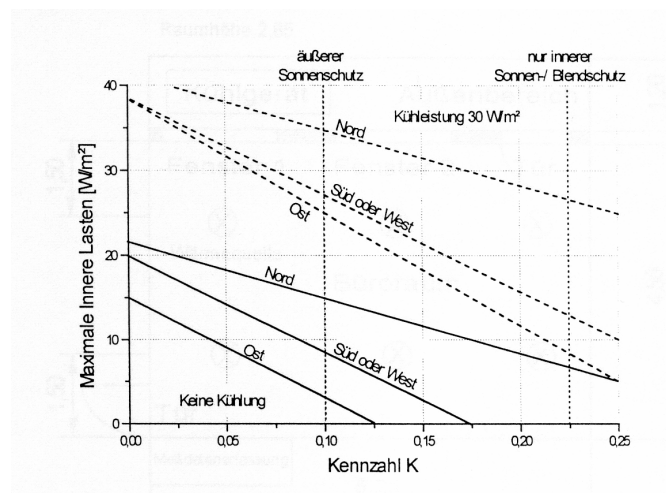


Abbildung 4: Grenzkurven der inneren Lasten für eine Überschreitung von 25°C in 10 % der Büroarbeitszeit, Quelle [23]

In Abbildung 4 sind die Grenzen für die innere Last bezüglich einer Überschreitung der Raumtemperatur von 25°C bei maximal 10 % der Büroarbeitszeit dargestellt. Die Werte gelten für Bürogebäude mit einer mittleren Baumasse und einer Doppelverglasung aus Klarglas ($g = 0,8$).

Die maximal möglichen inneren thermischen Lasten sind über einer Kennzahl K für solare Wärmeeinträge aufgetragen. Sie ist wie folgt definiert:

$$K = (1 - r) \times z \times g \times f \quad (6)$$

K	=	Kennzahl innere thermische Lasten
(1 - r)	=	Glasflächenanteil des Fensters (r = Rahmenanteil)
z	=	Minderungsfaktor für Sonnenschutz nach DIN 4108
g	=	Gesamtenergiedurchlassgrad nach DIN 4108
f	=	Anteil der Verglasung an der Fassade

Kennzahl K bedeutet die Durchlässigkeit der Gebäudehülle für solare Wärmeeinträge. Bei dem Wert K = 0 wäre die Fassade lichtundurchlässig.

Die obenliegenden gestrichelten Kurven sind für eine im Gebäude installierte Kühlleistung von 30 W/m², und die untenliegenden durchgezogenen Linien sind für Gebäude ohne RLT-Anlage. Die Hilfslinien bei der Kennzahl K = 0,1 mit äußerem Sonnenschutz und K = 0,224 nur mit innerem Sonnenschutz, gelten für einen Glasflächenanteil von 50% an der Fassadenfläche und einem Rahmenanteil des Fensters von 20 %.

Wenn die Grenze 25 °C bei weniger als 10 % der Arbeitszeit nicht überschritten werden soll, dann stellen die eingezeichneten durchgezogenen Linien die maximalen möglichen inneren Lasten dar. Ist ein äußerer Sonnenschutz vorhanden, erreicht die Kennzahl K einen Wert von ca. 0,1. Bei Süd- oder Westorientierung sind innere Lasten von etwa 8 W/m² zulässig. Hat die Fassade eine Ostorientierung, sind die maximalen möglichen inneren Lasten geringer.

Wenn der Raum zusätzlich gekühlt wird, darf wegen der Verzögerung durch die Speicherwirkung die innere Last nicht im gleichen Umfang vergrößert werden. Dies zeigen die gestrichelten Linien. Die inneren Lasten dürfen bei einer Kühlleistung von 30 W/m² bei außenliegendem Sonnenschutz und Ostorientierung etwa 25 W/m² betragen. Bei Süd- oder Westorientierung sind geringfügig höhere innere Lasten möglich.

3.7 Zusammenfassung

Eine Behaglichkeitszone bildet sich mit einer Raumlufttemperatur zwischen 20 – 27 °C und einer Luftfeuchtigkeit zwischen 30 – 60 % r. F.. Dabei darf die absolute Feuchte 11.5 g/kg nicht überschreiten. Um diesen Wert zu halten, verbrauchen heutige Verwaltungsbauten durchschnittlich 400 kWh/(m²a) im Jahr 1996 [24]. Bei Niedrigenergiegebäuden liegt dieser Wert unter 130 kWh/(m²a). Wahrscheinlich ist ein Nullenergiehaus für Verwaltungsbauten mit heutigem Stand noch nicht realisierbar, denn umfangreiche gebäudetechnische Einrichtungen sind notwendig, um für die Nutzer ausreichend behaglichen Zustand zu liefern. Bei der Planung einer Gebäudehülle sollten jedoch passive Maßnahmen umfassend integriert werden, nur so kann der Restenergiebedarf mit fossilen Brennstoffen minimiert werden.

Bisher sind mehrere Versuche in Deutschland durchgeführt worden, eine ausreichend Behaglichkeit in Gebäuden ohne Einsatz von zusätzlicher Energie zu ermöglichen. Der meteorologische Vergleich von Seoul und Berlin zeigt, dass dies in Seoul überhaupt nicht denkbar ist. Der Grund dafür ist, dass in Seoul sowohl die Außenklimabedingungen als auch die Arbeitsbedingungen völlig anders als in Berlin sind. In Seoul ist ein vollständiger Ausgleich der inneren und äußeren Kühllasten nur durch passive Maßnahmen nicht möglich. Um den Hochsommer durchzustehen, ist angemessenen Betrieb einer Klimaanlage unentbehrlich.

Es sei denn, die inneren thermischen Lasten könnten noch einmal drastisch und unten gesenkt werden. Hier geht es um die Veränderung bei den rechnerstützten Arbeitsplätzen. Die Röhrenbildschirme, auch Monitore genannt, verschwinden derzeit. Derzeit kommen die Flachbildschirme vermehrt zum Einsatz. Abgesehen von strahlungstechnischen Vorteilen dieser Flachbildschirme, benötigen sie deutlich weniger Energie als Röhrenbildschirme. Der Energiesparmodus neuerer Rechner hilft zusätzlich die inneren Lasten zu senken. Dies bedeutet eine Reduzierung der thermischen Last im Sommer, so dass weniger Kühlung erfordert wird. Im Winter wird jedoch zusätzlich Energie für das Heizen erforderlich.

4 Strömungsphysikalische Grundlagen bei der natürlichen Belüftung

4.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das strömungsphysikalische Verhalten im Räumen von Hochhäusern aufgrund der natürlichen Belüftung näher betrachtet.

Grundsätzlich steigt warme Luft nach oben, und kalte Luft fällt nach unten. Der Hauptgrund für dieses Phänomen ist die Veränderung der Dichte der Luft aufgrund der Temperaturänderung. Ähnlich entsteht auch eine Windströmung. Das Phänomen der Luftströmung im Gebäude bzw. im Raum kann in ähnlicher Weise verstanden werden. Die Luft bewegt sich bei Wind oder Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Wind kann den Luftwechsel innerhalb des Gebäudes bzw. des Raumes durch den Winddruck verstärken. Bei Windstille entsteht eine treibende Kraft zum Luftwechsel durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Diese Temperatur- und Dichtedifferenzen zwischen innen und außen erzeugen unterschiedliche Druckdifferenzen. Wenn die Temperatur innen höher als außen ist, strömt Außenluft im unteren Teil des Gebäudes bzw. des Raumes ein, und verlässt das Gebäude bzw. Raum wieder, wenn oben eine Öffnung vorhanden ist [25]. Dieser thermische Auftrieb gewährleistet eine natürliche Belüftung des Gebäudes bzw. des Raumes. Welche Einflüsse die Gebäude- bzw. Raumströmung auf die freie Lüftung hat, ist der Schwerpunkt des folgenden Kapitels.

4.2 Gebäude

4.2.1 Strömung im Gebäude

Durch die Anströmung des Gebäudes entstehen Druckdifferenzen. Die Höhe der Druckdifferenz hängt von einigen Faktoren ab. Zu diesen Faktoren gehören die Windgeschwindigkeit und –richtung, Gebäudehöhe und –form, sowie Umgebungsbebauung usw..

Die Windgeschwindigkeit, gleichzeitig auch der Winddruck, nimmt mit der Gebäudehöhe zu. Die mittlere Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe ist 1,5fach so hoch, wie in 10 m Höhe. Weil der Winddruck sogar quadratisch anwächst, beträgt er das 2,3fache [26]. Abhängig von dieser Geschwindigkeit, entstehen an der Außenfassade negative oder positive Druckdifferenzen gegenüber dem Inneren des Gebäudes. Das bedeutet, dass bei verschiedenen Räumen im Gebäude oder in

einem Geschoss unterschiedliche Druckwerte gegeben sein können. Wenn Räume mit unterschiedlichen Druckwerten durch eine Undichtigkeit oder das Öffnen einer Tür miteinander verbunden sind, entsteht eine Strömung zum Ausgleichen dieser Druckdifferenzen. Bei Großraumbüros, die Luv- und Lee-Seite mit unterschiedlichen Druckbeiwerten des Gebäudes verbinden, und bei mehreren miteinander verbundenen Geschossen, ist dieser Effekt deutlich zu spüren.

4.2.2 Freie Gebäudelüftung

Zwei Möglichkeiten für die Gebäudelüftung

Gebäude lassen sich in zwei Kategorien einteilen [27]:

- Gebäude mit mechanischer Lüftung
- Gebäude mit freier Lüftung

Für die Raumdurchströmung sind die Druckunterschiede gering. In der Gebäudedurchströmung gibt es allerdings große Unterschiede zwischen beiden Lüftungsarten.

Während die freie Lüftung zeitlich nicht konstant angetrieben wird, ist ein konstanter Antrieb bei der mechanischen Lüftung infolge der Unterstützung durch Ventilatoren gegeben. Dies ist der wichtigste Unterschied zwischen beiden Lüftungsarten. Bei freier Lüftung entsteht die Druckdifferenz im Raum oder im Gebäude zur Umgebung entweder durch Winddruck oder durch den Auftrieb infolge von Temperaturunterschieden zwischen innen und außen oder durch beide Einflüsse gleichzeitig.

Durch den Einfluss des Windes bilden sich Luv- und Leezonen am Gebäude mit Über- und Unterdruck aus. Die Gebäudedurchströmung erfolgt gemäß diesen Druckdifferenzen und Öffnungsquerschnitten. Diese Durchströmung können die Nutzer durch Fensteröffnen und –schließen regeln. Wenn der Antrieb an warmen windstillen Sommertagen null beträgt, kann eine Umkehrung der Strömungsrichtung entstehen. In diesem Fall sind die Temperaturen im Gebäude geringer als außen. Dagegen ist dieser Druckunterschied an einem kalten Wintertag oder bei starkem Wind sehr groß. Dann wird es schwierig, Strömung und Volumenstrom durch Fensteröffnen und –schließen natürlich zu regeln. In diesem Zusammenhang ist eine freie Lüftung problematisch zu sehen. Daher sollen die Größe der Öffnungen, bei Fenstern und Türen usw., für eine optimale freie Belüftung möglichst stufenlos von sehr kleinen bis großen Öffnungen regelbar sein.

Auftriebseffekt infolge der Temperaturdifferenz und Gebäudehöhe

Im Winter entstehen große Auftriebskräfte infolge Temperaturdifferenz und Gebäudehöhe. Diese Auftriebskräfte vergrößern sich mit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, und der Gebäudehöhe. Ein hohes Gebäude mit 100 m Höhe und 30 K Temperaturunterschied zwischen innen und außen hat einen Druckunterschied von 120 Pa. Den gleichen Wert verursacht eine Windgeschwindigkeit von 10 bis 11 m/s. Wenn ein großer Raum mit mehreren Geschossen verbunden wird, entsteht vertikal eine Schachtwirkung. Um diese unerwünschte Schachtwirkung zu vermeiden, müssen die Räume, wie Treppenhäuser, offene Innenräume und Aufzugsschächte usw., dicht geschlossen werden können, so dass sie einen Schleuseneffekt haben. Gleichzeitig ist aber eine solche Schachtwirkung an einem windstillen Sommertag für eine Gebäudedurchströmung erwünscht.

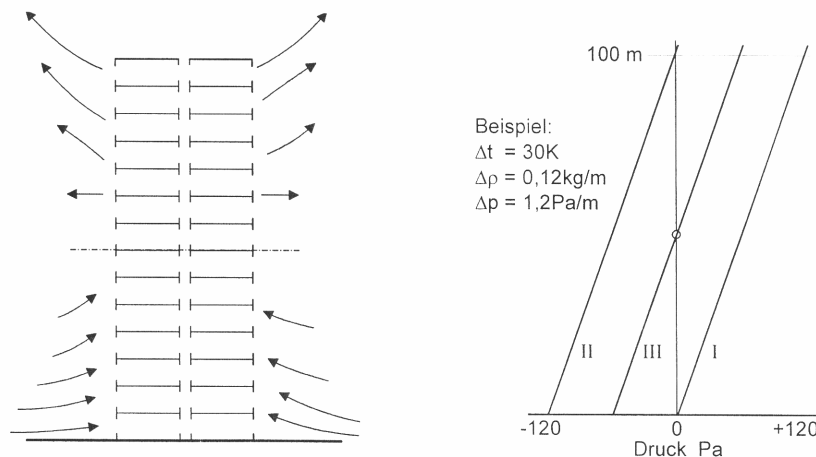


Abbildung 5: Druckverteilung im Hochhaus, Quelle [22]

Die Schachtwirkung eines Gebäudes kann in der Abbildung 5 beobachtet werden. Die Abbildung zeigt, wie groß die Druckdifferenz zwischen innen und außen bei einer Temperaturdifferenz von 30K sein kann. Die Druckverteilung über die Gebäudehöhe hängt von der Dichtigkeit des Gebäudes ab. Drei Fälle, wie in der Abbildung, können hier dargestellt werden. Ein ganz dichtes Gebäude nur mit unteren Öffnungen zeigt die Linie I. Der Druckunterschied existiert unten nicht. Oben ist er am größten. Bei einem ganz dichten Gebäude mit ausschließlich oberen Öffnungen (die Linie II) existiert der Druckunterschied oben nicht. In diesem Fall ist er unten am größten. Bei einem realen Gebäude kommt eine gleichmäßige Undichtigkeit auf der gesamten Oberfläche am häufigsten vor. Diese Druckverteilung zeigt die Linie III. Ein Unterdruck entsteht unten, und ein Überdruck entsteht oben. Daher strömt die Außenluft im unteren Gebäudeteil ein, strömt nach oben, und anschließend strömt

sie im oberen Gebäudeteil wieder nach außen aus. Eine neutrale Zone, ohne Druckunterschied, bildet sich in der Gebäudemitte.

Schachtwirkungen können durch Treppenhäuser, Technik- und Aufzugsschächte oder Atrien entstehen. Bei einer höheren Innentemperatur als außen entsteht eine Druckdifferenz Δp von unten nach oben, die sich mit der Dichtedifferenz $\Delta \rho$ der Luft innen und außen und der Gebäudehöhe h proportional vergrößert. Die Größe kann mit folgender Gleichung (7) berechnet werden.

$$\Delta p = \Delta \rho \times g \times h \quad (7)$$

$$\Delta \rho = \left| \frac{\Delta t}{T} \right| \times \rho \quad (8)$$

Δp	:	Druckdifferenz zwischen Zu- und Abströmung (oben und unten) (Pa)
h	:	Höhe (m)
$\Delta \rho$:	Dichtedifferenz zwischen Zu- und Abströmung (außen und innen) (kg/m ³)
g	:	Fallbeschleunigung (m/s ²)
Δt	:	Temperaturdifferenz zwischen innen und außen (°C)
T	:	absolute Temperatur für den Bezugspunkt der Dichte (K)
ρ	:	Dichte der Luft (kg/m ³)

4.3 Raum

4.3.1 Strömung im Raum

Ein Unterschied besteht zwischen mechanischer und freier Lüftung sowohl bei Räumen als auch bei Gebäuden. Die treibende Kraft der Strömung ist immer der Druckunterschied zwischen Raum und Umgebung. Bei der freien Lüftung sind die Luftdurchlässe, Türen, Fenster oder andere nicht als Luftdurchlässe konzipierte Öffnungen. Sie stellen aber aus der Sicht der Lüftungstechnik nicht immer die beste denkbare Lösung dar.

4.3.2 Freie Raumlüftung

Zwei Einsatzmöglichkeiten bei der Raumlüftung

Die Belüftung mit einer ausreichenden Menge Außenluft ist in Aufenthaltsräumen aus hygienischen Gründen erforderlich. Dafür bestehen zwei Möglichkeiten, RLT-Anlage

oder Fensterlüftung. Beim Verzicht auf eine RLT-Anlage kann der Raum lediglich mit dem Fenster gelüftet werden. Räume ausschließlich mit natürlicher Lüftung weisen aber einige Nachteile auf. Zu diesen gehören deutlich erhöhter Wärmebedarf, zu geringe Luftfeuchten im Winter, hohe Raumtemperaturen im Sommer, zeitweise hohes Zugscheinungsrisiko durch starken Windanfall, niedrige Außenlufttemperaturen und schlechte Schadstoffabfuhr bei Windstillen. Aus diesem Grund ist es grundsätzlich sinnvoll, dass Räume sowohl raumluftechnisch als auch natürlich optimiert belüftet werden.

Dauer- und Stoßlüftung bei der natürlichen Raumlüftung

Der Raumzustand ist abhängig von der Außentemperatur, den inneren Lasten und der Fensterstellung. Davon abhängig regulieren sich die Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten im Raum. Die natürliche Lüftung kann als Dauerlüftung oder Stoßlüftung erfolgen.

Unter einer Dauerlüftung kann ein konstanter Außenluftstrom durch das Fenster in den Raum während der ganzen Nutzungszeit verstanden werden. Eine richtige Fensterstellung ermöglicht einen stationären Zustand im Raum. Unter der Stoßlüftung wird ein periodisches Öffnen und Schließen des Fensters verstanden. Innerhalb kürzester Zeit bildet sich ein großer Luftaustausch zwischen Raum und Umgebung aus. Diese Stoßlüftung ist insofern nachteilig, weil empfindliche Menschen oder Personen nahe am Fenster eine gewisse Unbehaglichkeit in Kauf nehmen müssen.

Strömung durch Fensterlüftung im Winter und im Sommer

Der Luftwechsel bei geöffnetem Fenster zwischen Raum und Umgebung erfolgt infolge Winddruck oder thermischem Auftrieb. An windigen Tag ist die Luftwechselzahl durch den Winddruck hoch, und gleichzeitig ist die Luftgeschwindigkeit im Raum auch hoch. Dieser Fall ist dann nicht problematisch, wenn die Fenster bei zunehmendem Wind und Zugscheinungsrisiko entsprechend geregelt geschlossen werden können. Der kritische Fall entsteht immer bei Windstille, da der Luftwechsel ausschließlich durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen entsteht. Aus dem Grund wird auf diesen kritischen Fall näher eingegangen.

Der winterliche Temperaturunterschied zwischen innen und außen hat einen großen Dichteunterschied der Luft zur Folge. Dadurch entsteht ein Druckunterschied zwischen außen und innen. Wenn einströmende Luft kälter als die Luft im Raum ist, fällt sie an unteren Fensterbereich zu Boden und vermischt sich dabei teilweise mit

der Raumlufte. Die Abluft verlässt den Raum über den oberen Fensterteil. Der ein- und ausströmende Massenstrom ist gleich groß. Die Abbildung 6 zeigt qualitativ den Verlauf der Raumluftströmung bei geöffnetem Fenster mit gekippter Stellung.

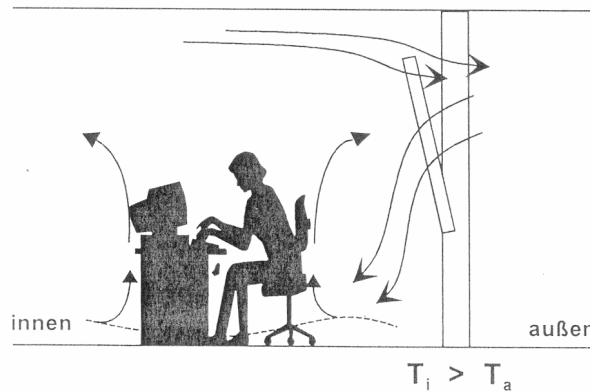


Abbildung 6: Raumluftströmung bei Fensterlüftung, Quelle [27]

Im sommerlichen Fall, wenn die Raumlufttemperatur im Gebäude niedriger als außen ist, wird das sommerliche Strömungsbild umgekehrt erscheinen. Die Luft strömt über den oben geöffneten Fensterteil in den Raum und durchmischt sich mit der Raumlufte. Die Abluft, verlässt den Raum durch den unten geöffneten Fensterteil, weil die Temperatur der Abluft niedriger als die Außenlufttemperatur ist. Dieser Strömungszustand existiert im Sommer nur solange, wie durch die Speichermasse des Gebäudes eine Kühlung der Luft möglich ist.

4.4 Zusammenfassung

Eine gute Außenluftqualität und ein niedriger Außenlärmpegel sind die Voraussetzung für eine Fensterlüftung. Es sei denn, man behauptet, dass bei freier Lüftung eine Nichteinhaltung der Behaglichkeitskriterien akzeptabler erscheint, als bei maschineller Lüftung. Die entsprechenden Gründe sind im psychologischen Bereich zu suchen, da eine mechanische Lüftung häufiger abgelehnt wird.

Allerdings ist das Prinzip der freien Lüftung sehr problematisch bei Windstille und hoher Außentemperatur. Die Fenster, die großzügig geöffnet werden können, sollten auf jeden Fall zur Verfügung sein, so dass ein ausreichender Luftwechsel auch bei kleinen Temperaturdifferenzen erreichbar wird. Zusätzlich müssen die Fensteröffnungen möglichst genau einstellbar sein, damit sie im Winter sehr klein und in der Übergangszeit groß gehalten werden können. Dann kann der benötigte Zuluftstrom individuell angepasst werden.

Fensterlüftung scheint bei Hochhäusern wegen des hohen Winddruckes grundsätzlich problematisch. Viele alte Hochhäuser mit Fensterlüftung, wie in New York, beweisen aber das Gegenteil. Voraussetzung ist, dass die Fenster dicht schließbar sind. Der Mindestluftwechsel muss auch bei Sturm und geschlossenen Fenstern erreicht werden. Zusätzlich muss ein Gebäude von Raum zu Raum und von Geschoss zu Geschoss möglichst dicht sein. Ansonsten treten große Luftgeschwindigkeiten im Gebäude infolge der Auftriebskräfte und Schachtwirkungen auf.

5 Doppelfassade

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird auf Doppelfassaden näher eingegangen. Diese Fassade als Gebäudehülle spielt gegenwärtig eine wichtige Rolle für das klimagerechte Bauen. Nicht nur energetische Vorteile sondern auch Aufenthaltsqualität werden hier erwartet. Ausschließlich Fassaden mit Fensterlüftung werden im Folgenden betrachtet.

Zunächst wird die Notwendigkeit einer Fensterlüftung untersucht. Dann wird die Problematik der konventionellen einschaligen Fassade erläutert, d.h. wie sich der Einsatz einer einschaligen Fassade bei unterschiedlichen Klimata und Jahreszeiten negativ auswirkt. Dann wird die Doppelfassade sowohl prinzipiell als auch strömungstechnisch untersucht, und es werden deren Vor- und Nachteile diskutiert. Es folgt eine Klassifikationsproblematik und eine Vertiefung der Einsatzmöglichkeiten. Besonders wird dabei auf Probleme derzeitig ausgeführter Doppelfassaden eingegangen.

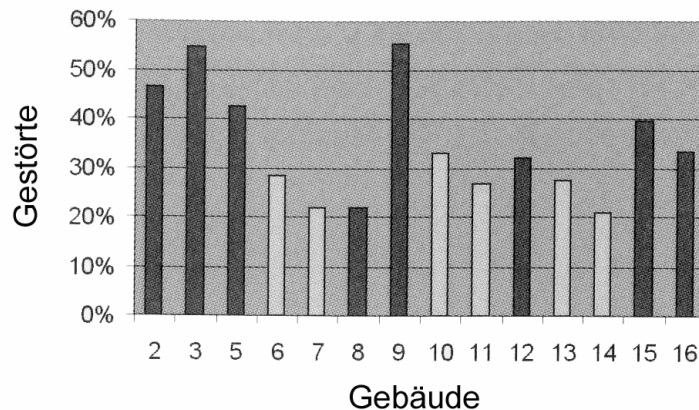
5.2 Fensterlüftung // Allgemein

Zwei negative Begriffe werden im Fachkreis „Architektur und Gebäudetechnik“ diskutiert, SBS (Sick–Building-Syndrom) und TBS (Tight–Building-Syndrom) [28].

Unter diesem fachlichen Begriff SBS wird die Beeinträchtigung des menschlichen Wohlbefindens verstanden. Zu seinen Symptomen gehören z. B. Kopfschmerzen (49 %), Augenschmerzen (46 %), Erkältungen (33 %) und Kreislaufprobleme (24 %) usw.. Wenn mehr als 20 % der Nutzer im Gebäude über diese Symptome klagen, wird das Gebäude als „krank“ bezeichnet. SBS ist nicht auf klimatisierte Gebäude beschränkt.

Vom TBS wird bei einem Gebäude dann gesprochen, wenn der Luftaustausch, unabhängig vom Betrieb der RLT-Anlage infolge Planungs- und Ausführungsfehlern, quantitativ den Anforderungen nicht entspricht. Die fehlerhafte oder nicht ausreichende Lüftung der Schadstoffe von Baustoff, Farbe und Einrichtungen usw. gehören zu Ursachen des von TBS.

Aus diesem Grund weisen natürlich belüftete Gebäude meistens eine geringere Anzahl von Störungen und Krankheitssymptomen auf. (Siehe Abbildung 7) Gebäude mit natürlichen Lüftungsmöglichkeiten haben eine deutlich geringere Anzahl an Meldungen von Befindlichkeitsstörungen, als Gebäude mit mechanischer Belüftung. Man muss dabei bedenken, dass die Gebäude mit mechanischer Lüftung höhere thermische Lasten haben und dass die hohen thermischen Lasten ein Teil des Problems sind.



Hellgrau : Gebäude mit Fensterlüftung

Dunkel : Gebäude ausschließlich mit mechanischer Lüftung

Abbildung 7: Anteil der als „befindlichkeitsgestört“ eingestuftten Personen in den untersuchten 15 Gebäuden in %, Quelle [29]

5.3 Problematik der einschaligen Fassade

5.3.1 Allgemein

In diesem Kapitel wird das Problem der einschaligen Fassade betrachtet. Die Sonnenstrahlung als wichtige natürliche Wärmequelle sollte grundsätzlich in das Fassadenkonzept integriert werden, um ein Gebäude möglichst passiv betreiben, und seinen Energiehaushalt dadurch optimieren zu können. Die Solareinstrahlung muss daher regulierbar sein. Aus diesem Grund spielt der Sonnenschutz eine entscheidende Rolle. Er lässt idealerweise die Sonnenstrahlung im Winter nach innen durchdringen und hält sie im Sommer draußen. Durch die Optimierung dieser Maßnahme kann der Heiz- und Kühlbedarf positiv beeinflusst werden. Besonders bei den heutigen Verwaltungsgebäuden kann die Heizlast während der Übergangszeit bequem gedeckt werden. Allerdings müssen Maßnahmen gegen eine Überhitzung auch schon bei warmen Wintertagen bedacht werden. Auch belastet die Sonnenstrahlung das Gebäude im Sommer stark, da sie meist den wesentlichen Teil

des Kühlbedarfes zur Folge hat. Im Sommer muss daher ihr Eindringen verhindert werden. Grundsätzlich geht es also um die Regulierung der Sonneneinstrahlung bei einschaligen Fassaden an Hochhäusern.

5.3.2 Glasarten

Dank seiner Eigenschaft der Transparenz wird Glas in der Baubranche oft eingesetzt. Glas hat einen energieaufwendigen Produktionsprozess, während der Baustoff „Glas“ selbst durch seine Nachhaltigkeit ein sehr guter Stoff mit hoher Wiederverwendungsmöglichkeit ist. Inzwischen hat sich der Energieverbrauch bei seiner Produktion infolge der Recyclebarkeit, und verbesserter Maschinenteknik und Effizienz reduziert [30].

Infolge seiner Transparenz kann die Sonnenstrahlung mit dem Werkstoff Glas allein nicht kontrolliert werden. Seine Transparenz ist von dem Anteil des Eisenoxids (Fe_2O_3) abhängig [14]. Die Grünfärbung spielt eine Hauptrolle für den Strahlungsdurchlass bestimmter Wellenlängen. Je weniger der Anteil von Fe_2O_3 ist, desto mehr reduziert sich der Absorptionsgrad und steigt der Transmissionsgrad. Abbildung 8 zeigt dieses Verhältnis. Im sichtbaren und infraroten Bereich wird deutlich, inwiefern sich der Transmissionsgrad nach dem Anteil von Fe_2O_3 bei Glas ändert. Danach werden unterschiedliche Verglasungsarten, wie Einfach-, Isolier-, Absorptions- und Reflektionsglas vorgestellt. Je nach Anforderungen können unterschiedliche Glasarten eingesetzt werden. Und können bestimmte Eigenschaften kombiniert eingesetzt werden.

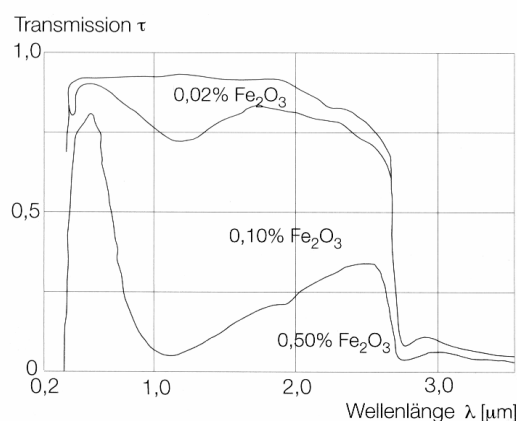


Abbildung 8: Spektraler Verlauf der Transmission bei verschiedenen Fe_2O_3 Anteilen, Quelle [14]

Bei Einfachglas ist der Wärmedämmeffekt sehr gering. Daher kommt es heute kaum mehr zum Einsatz. Bei dieser Verglasung kann der kurzwellige Anteil der

Infrarotstrahlung ungehindert passieren. Die Umschließungsflächen und Gegenstände im Raum absorbieren die Strahlung und geben sich wieder als langwellige Strahlung ab. Diese langwellige Strahlung kann das Glas dann nicht mehr transmittieren. Sie bleibt im Raum.

Der Wärmedurchgangkoeffizient bei einem Isolierglas ist wesentlich geringer. Diese Mehrscheibenkonstruktion (2 oder 3-fach) hat eine Luft- oder Edelgasfüllung, wie z.B. Argon- oder Krypton, zwischen den Scheiben. Damit verringert sich die Wärmeleitfähigkeit deutlich.

Bei einer Absorptionsverglasung findet eine Frequenzumwandlung der Strahlungsenergie statt. Infolge des Metalloxidanteils wird die Absorption der Sonnenstrahlung verstärkt und erwärmt die Glasscheibe. Sie emittiert die langwellige Wärmestrahlung und vergrößert die konvektive Wärmeabgabe. Aus dem Grund ist der Einsatz dieser Verglasung in kalten Regionen sinnvoll. In warmen und heißen Regionen ist der Einsatz keine sinnvolle Lösung, da der gesamte g-Wert durch die sekundäre Wärmeabgabe steigt.

Eine Reflexionsverglasung reflektiert die auftreffende Strahlung aufgrund ihrer besonderen Beschichtung. Dazu gehören Beschichtungen aus Gold oder Kupfer, oder aus mit Metall bedampften Folien usw.. Besonders im infraroten Bereich ist hier der Reflektionsgrad sehr hoch. Der Reflektionsanteil dieser Verglasung ist bei senkrechtem Einfall von der Brechzahl und bei schrägem Fall vom Einfallswinkel abhängig. Weil die Sonneneinstrahlung infolge des hohen Reflektionsgrades dieser Verglasung nicht nach innen eindringen kann, eignet sich diese Verglasungsart auch für Verwaltungsbauten. Eine passive Nutzung der winterlichen Sonneneinstrahlung ist nicht besonders hoch.

Ein Nachteil bei Absorptions- und Reflektionsverglasungen ist die geringere Lichtdurchlässigkeit. Daher wird eine zusätzliche künstliche Beleuchtung vermehrt notwendig. Bei den Einfach- und normalen Isolierverglasungen wird dagegen die höhere Wärmelast thermisch von Nachteil, sobald die Fassade nicht wirkungsvoll abgeschirmt wird. Diese gegenseitige Abhängigkeit stellt ein grundsätzliches Problem dar.

5.3.3 Position des Sonnenschutzes

Der Sonnenschutz spielt die Hauptrolle bei der Regulierung der Sonneneinstrahlung. Die Auswirkung des Sonnenschutzes ist je nach gewählter Variante sehr unterschiedlich [31]. Aus diesem Grund ist der Einsatz eines Innen- oder

Außensonnenschutzes dabei von entscheidender Bedeutung. So ist in kalten Regionen z. B. ein innenliegender Sonnenschutz bestens geeignet, um die Sonneneinstrahlung passiv zu nutzen. In warmen Regionen ist dagegen ein außenliegender Sonnenschutz unbedingt erforderlich, um das Gebäude vor der Sonneneinstrahlung gut abzuschirmen. Ein innenliegender Sonnenschutz kann einen außenliegenden Sonnenschutz nicht ersetzen, dasselbe gilt auch umgekehrt. Daher ist der gezielte Einsatz eines Sonnenschutzes in den gemäßigten Klimazonen, wo z. T. kalte und z. T. warme Jahreszeiten gleichzeitig bestehen, besonders wichtig. Um den Sonnenschutz am effektivsten in gemäßigten Regionen zu nutzen, ist der gleichzeitige Einsatz von sommerlichem Außensonnenschutz und winterlichem inneren Blend- oder Innensonnenschutz sinnvoll.

5.3.4 Orientierung des Büros

Eine wichtige Rolle spielt die Orientierung des Büros für den Energiehaushalt eines Gebäudes. Im Sommer wird die höchste Raumlufttemperatur auf der Westseite erreicht. Dagegen ist sie auf der Ostseite infolge der Wärmespeicherung und der niedrigen morgendlichen Außentemperaturen wesentlich niedriger. Weil die Sonne im Sommer bei einem Südbüro tagsüber hoch steht, ist die Raumlufttemperatur in einem Westbüro höher als in einem Südbüro. Bei Gebäuden mit großen Fenstern sind Klimaanlage zur Abführung der erheblichen thermischen Last im Sommer daher unentbehrlich. Im Winter dagegen verringert die Sonneneinstrahlung die notwendige Heizenergie. Besonders günstig sind hierbei südorientierte Fensterflächen, da die Sonne tagsüber im Winter niedrig steht und die solare Einstrahlung besser eindringen kann. Gegenüber fensterlosen Fassaden ist im Winter eine jährliche Energieersparnis durch die Solareinstrahlung in einer Größenordnung von ca. 15 % möglich.

5.4 Doppelfassade

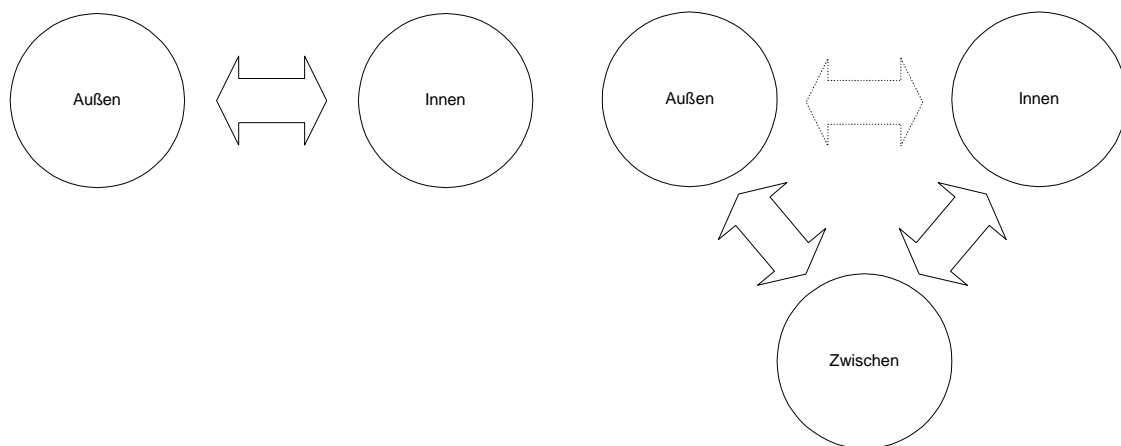
5.4.1 Prinzip – Fassade mit Klima und Jahreszeit angepassten Einstellungsmöglichkeiten

Allgemein

„Doppelfassaden“ sind häufig insofern zu kritisieren, da der Haupteffekt von Doppelfassaden vor allem in der architektonischen Wirkung liegt. Bis Mitte der 90er verging kaum ein architektonischer Wettbewerb ohne Doppelfassadenkonzeption. Inzwischen wird sie auf unterschiedlichste, teilweise kuriose Weise bezeichnet, so z.

B. Synergie-Fassade, intelligente Fassade, High-Tech-Fassade, Sol Skin, Twin face, Kristallhaut mit Firmament-Reflektor usw.. Es wurden ständig mehr Doppelfassaden realisiert. In Berlin allein gibt es inzwischen mehr als 15 Projekte. Es ist noch keine Statistik vorhanden, wie viele insgesamt in Deutschland bisher gebaut wurden. Gegenüber Mitte der 90er stieg die realisierte Zahl allmählich, unabhängig von der Größe des Objekts. Es scheint, dass die Doppelfassaden einen festen Platz in der Baubranche gefunden haben. Trotz dieser steigenden Tendenz muss gesagt werden, dass nur wenige Doppelfassaden tatsächlich positiv bewertet werden können. Von „schlecht“ bis „sehr gut“ reicht dabei das Spektrum. Es fehlt gegenwärtig noch eine neutrale allgemeingültige Beurteilung im Vergleich zu einschaligen Fassaden.

Konstruktion



Einschalige Fassade

Doppelschalige Fassade

Abbildung 9: Prinzipieller Konstruktionsunterschied zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden

Konstruktiv besteht eine Doppelfassade prinzipiell aus einer Außen- und einer Innenverglasung mit einem zwischen beiden Verglasungen angeordneten Sonnenschutz. Dank dieser zusätzlichen Außenverglasung kann die gesamte Wirkungsweise gegenüber einer einschaligen Fassade dramatisch verändert werden, weil eine höhere Variabilität bei der Einstellung von Sonnenschutz, Außen- und Innenfenstern gegeben ist. Der Fassadenzwischenraum zwischen beiden Verglasungen bildet eine thermische Pufferzone. Hier liegt der hauptsächliche Unterschied zu einschaligen Fassaden. Während ein unmittelbarer Bezug zwischen innen und außen bei der einschaligen Fassade besteht, haben die Innen- und Außenfassaden einen mittelbaren Bezug durch einen Zwischenraum. Nur bei einigen

wenigen Doppelfassaden kommt ein direkter Bezug zwischen innen und außen Zustände. (Siehe Abbildung 9) Das Innenklima hängt bei Doppelfassaden daher insbesondere von der Ausbildung dieses Zwischenraumes ab.

Bei der einschaligen Fassadenkonstruktion kann lediglich die Sonneneinstrahlung reguliert werden. Eine Doppelfassade ermöglicht eine passive Lüftung durch den Fassadenzwischenraum. Hierin liegt der größte Vorteil der Doppelfassade gegenüber den einschaligen Fassaden. Je nach Ausführung der Doppelfassaden, kann sich dieses Konzept im Winter sehr positiv auswirken.

Die Wirkung der Doppelfassade hängt dabei von Konzeption, Dimensionierung und konstruktiver Ausführung des Fassadenzwischenraumes ab. Die Auslegung der Fassadenparameter, wie z. B. Lage und Größe von Öffnungen, Lage des Sonnenschutzes, Abstand zwischen äußerer und innerer Fassade, spielen eine wesentliche Rolle bei der Konzeption von Doppelfassaden.

Vor- und Nachteile

Für eine optimale Ausnutzung des regionalen Klimas muss die Hülle eines Gebäudes variabel auf die Witterung reagieren können. Nachfolgend sind die bauphysikalischen Vor- und Nachteile von Doppelfassaden aufgelistet.

- Verbesserter Schallschutz gegen Außenlärm trotz freier Lüftung (je nach Öffnungsart - einen Vorteil von 5 bis 10 dB) [32]
- Verlängerung der winterlichen Nutzungsdauer, bzw. der gesamten Nutzungszeit der Fensterlüftung. Bei einem Gebäude mit 100m Höhe kann sich die gesamte Nutzungsdauer von Öffnungsflügeln bei Doppelfassaden gegenüber einschaligen Fassaden von 44 % auf 79 % verlängern [33].
- Reduzierung der Lüftungswärmeverluste durch die passiven Nutzung der vorerwärmten Außenluft im Fassadenzwischenraum
- Sichere Nachtkühlungsmöglichkeit der Gebäudemassen im Sommer
- Reduzierung der Druckbeiwerte infolge Wind – daher wird eine Fensterlüftung auch an windigen Tagen möglich und die Türöffnungskraft bleibt unter der Komfortgrenze (40-60 N), deren oberer Grenzwert bei 100 N liegt [34].
- Geringere Kühllast gegenüber einschaligen Fassaden mit ausschließlichem Innensonnenschutz bei geschlossenem Fenster infolge der niedrigeren Transmissionsrate
- Anwendbarkeit eines Außensonnenschutzes auch bei hohen Gebäuden
- Platzangebot für Tageslichtlenksysteme im Fassadenzwischenraum

Nachteile sind:

- Reduzierung der Nutzungsdauer der Fensterlüftung im Sommer bzw. manchmal auch in der sonnigen Übergangsjahreszeit infolge der Überhitzung im Fassadenzwischenraum
- Sowohl horizontale als auch vertikale Schallübertragungsgefahr durch die Fensterlüftung bei nicht richtig abgetrennter Abschottung
- Zeitweise Gefahr von unzureichender Außenluftzufuhr bei Fensterlüftung
- Gefahr der horizontalen und vertikalen Übertragung von kontaminierter Luft
- Erhöhung der Baukosten gegenüber einschaligen Fassaden
- Höhere Betriebskosten durch aufwendige Reinigung infolge der doppelten Glasscheiben

Trotz dieser Aufteilung von Vor- und Nachteilen sind die Eigenschaften je nach Doppelfassadentyp sehr unterschiedlich. Daher muss der Aufbau einer Doppelfassade gemäß den unterschiedlichen Randbedingungen differenziert betrachtet werden.

Thermischer Auftrieb bei einer Doppelfassade

Dichteunterschied in der Luft verursacht den thermischen Auftrieb. Bei entsprechenden Öffnungen entsteht eine Luftströmung im Fassadenzwischenraum. Da die Luft im Fassadenzwischenraum durch die Sonnenstrahlung eine höhere Temperatur als außen hat, ist sie leichter als die Außenluft. Der Druckunterschied zwischen Fassadenzwischenraum und außen wird durch Strömung ausgeglichen. Beim unteren Zuluftschlitz entsteht Überdruck, der die kalte Außenluft über den unteren Schlitz hinein drückt. An der Innenseite am oberen Abluftschlitz entsteht ebenfalls ein Unterdruck, der die erwärmte Luft durch die Sonnenstrahlung über den oberen Schlitz nach außen hinaus drückt [35]. Durch den Druckunterschied zwischen oberen und unteren Schlitz im Fassadenzwischenraum entsteht der thermische Auftrieb, so dass sich die Luft nach oben bewegt. Diese Auftriebsgröße ist abhängig von der Höhe zwischen Zu- und Abluftöffnung und dem Temperaturunterschied zwischen innen und außen. Diese Größe ergibt sich nach der folgenden Gleichung (7).

$$\Delta p = \Delta \rho \times g \times h \quad (\text{siehe Kapitel 4-2-2}) \quad (7)$$

Bei geöffneter Innenfassade ändert sich die Strömung durch den thermischen Auftrieb aufgrund der Sonneneinstrahlung in der Fassade. Bei Windstille ohne Sonneneinstrahlung tritt die in den Fassadenzwischenraum strömende Außenluft im

unteren Fensterbereich des Raumes ein und bildet eine Raumwalze, die etwa in der Raummitte wieder zur Fassade gerichtet abströmt und den Raum verlässt. Mit steigender Sonneneinstrahlung auf die Fassade wandelt sich die Lichtstrahlung an der im Fassadenzwischenraum angeordneten Sonnenschutzeinrichtung in Wärme um. Als Folge erwärmt sich die Luft im Zwischenraum und es entsteht eine Konvektionsströmung von unten nach oben. Wenn die Temperatur im oberen Fassadenzwischenraum höher als die Raumlufttemperatur ist, fließt die im Fassadenzwischenraum erwärmte Luft in den oberen Raumbereich ein, und strömt in der Raummitte wieder nach außen ab [36]. (siehe Abbildung 10)

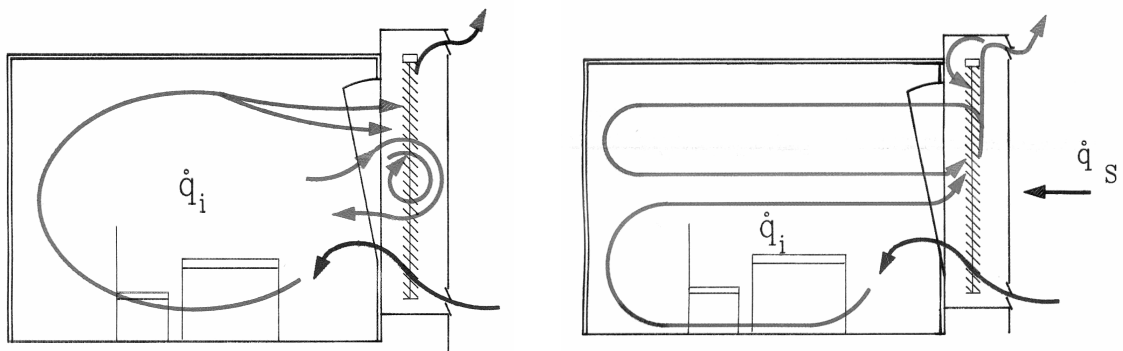


Abbildung 10: Luftströmung bei Windstille ohne und mit Sonneneinstrahlung, Quelle [36]

5.4.2 Klassifikation

Allgemein

Unterschiedliche Konstruktionen zu klassifizieren, ist eine schwierige Arbeit. Bei dieser Klassifizierung geht es hauptsächlich um die Entwicklung einer „Allgemeingültigkeit“, die objektiv anerkannt werden kann. Im Hintergrund steht „Typologie“. Diese typologische Betrachtung behandelt, aus welchem Gesichtspunkt unterschiedliche Beispiele auseinandergesetzt werden. Bei der Doppelfassade soll diese Logik auch bestehen. Die meisten Klassifikationen, die bisher versucht wurden, waren eher nach der Gestaltung durchgeführt:

- Nach Blumenberg [37] : Vorhangfassade, Umluftfassade, Korridorfassade, Kasten-Kasten-Fassade, Schacht-Kasten-Fassade
- Nach Oesterle [35] : Kastenfenster, Schacht-Kasten-Fassade, Korridor-fassade, Mehrgeschossfassade

Bei dieser gestalterischen Auseinandersetzung wird nicht berücksichtigt, dass die thermischen Eigenschaften der Doppelfassaden dabei nicht klassifiziert werden. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der hier durchgeführten Klassifikationsmethode in den thermischen Eigenschaften. In diesem Kapitel wird die klassische Klassifikationsmethode der Doppelfassade mit der Methode vom Verfasser verglichen. Auf der Basis der Klassifikationsmethode vom Verfasser werden die Gegenstandsanalyse im Kapitel 6 und die Simulationen im Kapitel 7 durchgeführt.

Klassifikation nach den thermischen Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften sind von der Schließart der Außenöffnungen und dem offenen Anteil der Außenfassaden abhängig. Bei der vom Verfasser entwickelten Klassifikation spielen diese beiden Aspekte die Hauptrolle. Wenn diese beiden Aspekte kombiniert werden, kann das folgende Ergebnis dargestellt werden. *(siehe Abbildung 11)*

Typ 1 – Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitz an der Außenfassade

Diese Art ist eine der einfachsten Doppelfassaden. Am meistens wurde sie Mitte der 90er Jahre eingesetzt. Im Winter besteht eine positive Auswirkung ausschließlich bei geöffneter Innenfassade, weil die Innenräume durch die vorerwärmte Außenluft im Fassadenzwischenraum ohne zusätzlichen Energieaufwand natürlich belüftet werden können. Bei geschlossener Innenfassade wird die Wärme, die passiv im Fassadenzwischenraum gewonnen wurde, energetisch kaum benutzt. Es folgt ein energetischer Nachteil. Diese Konstruktion ist aufgrund der Transmissionswärmeverluste nicht besonders vorteilhaft, da der Fassadenzwischenraum permanent unabhängig von der Außentemperatur belüftet wird. In der Übergangszeit ist eine optimale Belüftung durch Fenster möglich. An stark sonnigen Tagen der Übergangsjahreszeit und im Sommer ist aber eine Fensterlüftung infolge der Überhitzung im Fassadenzwischenraum nicht möglich. Als Folge wird die Nutzungsdauer der Fensterlüftung im Sommer schnell eingeschränkt. Jedoch besteht eine sichere Nachtkühlungsmöglichkeit.

Typ 2 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade

5 Doppelfassade

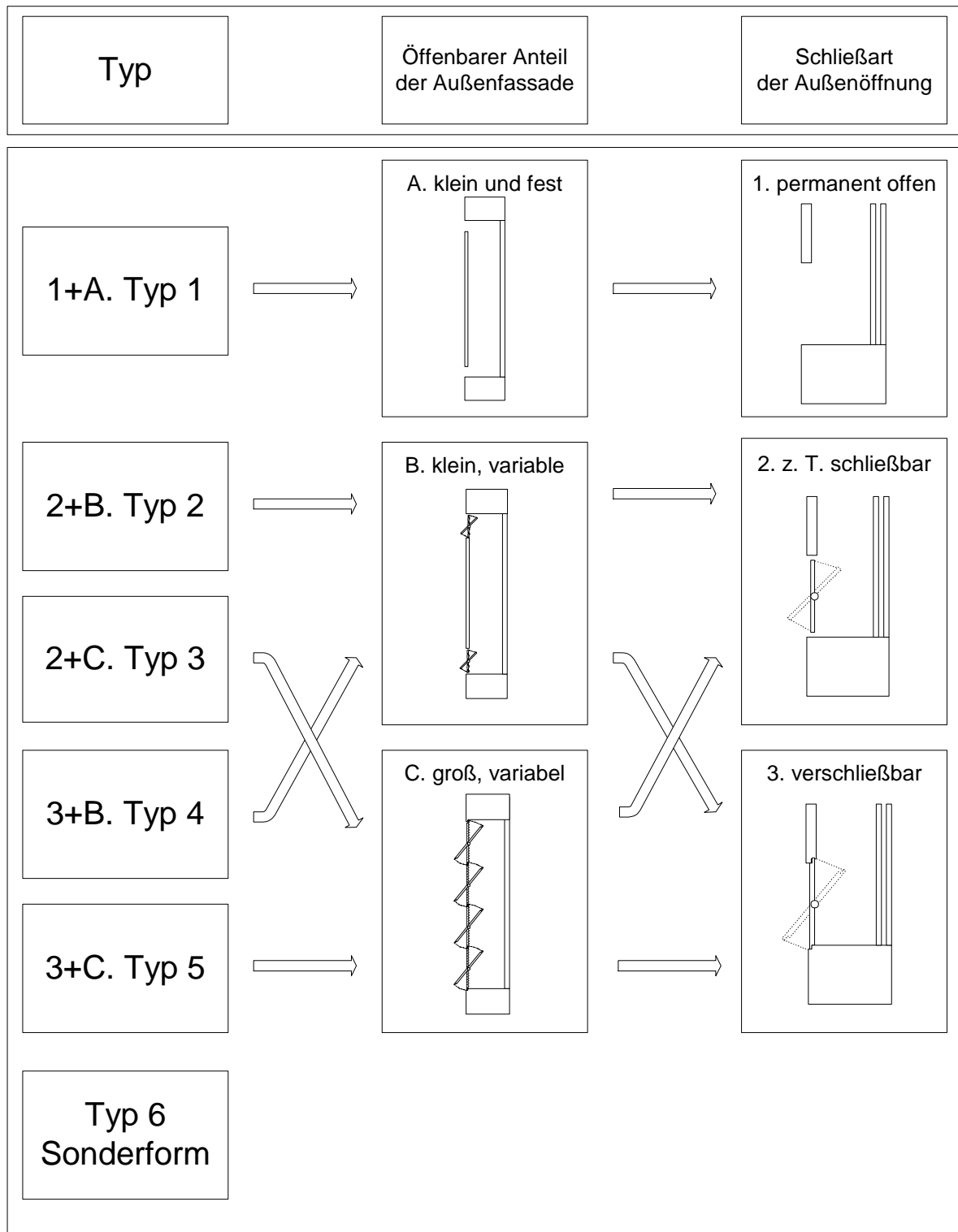


Abbildung 11: Klassifizierung nach thermischer Auswirkung

Diese Konstruktion hat gegenüber der ersten Doppelfassadenvariante zusätzliche Klappen- oder Steuerungsmechanismen in den Lüftungsschlitzen, um die Hinterlüftung im Fassadenzwischenraum zu regulieren. Durch die regulierte Hinterlüftung kann der Nachteil von Typ 1 im Winter deutlich verbessert werden. Die Auswirkungen in der Übergangs- und Sommerzeit hängen von der Größe dieser

Öffnungen ab. Je mehr die Außenfassade öffnenbar ist, desto besser kann dieser Typ in dieser Zeit funktionieren, desto geringer wird die Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum, weil ein größerer Volumenstrom im Fassadenzwischenraum gegeben ist.

Typ 3 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnenbarer Außenfassade

Typ 3 hat eine größere oder gar geschosshoch öffnenbare Außenfassadenkonstruktion. Im Winter hat dieser Typ die gleiche Wirkung wie die regulierbare Hinterlüftung Typ 2. Weil die Außenfassade ausreichend bzw. ganz geöffnet werden kann, muss die thermische Wirkung dieses Typs in der Übergangs- und Sommerzeit gegenüber Typ 1 und 2 viel besser bewertet werden. Es besteht kaum eine Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum.

Typ 4 und 5 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig und großflächig öffnenbarer Außenfassade

Gegenüber der Doppelfassadenvariante von Typ 2 und 3 liegt der größte Unterschied vor allem in der (dicht) verschließbaren Außenfassade. Hier besteht die Möglichkeit, den Fassadenzwischenraum lufttechnisch ganz abzuschließen, wodurch ein nicht hinterlüfteter Bereich mit guten Wärmeschutzeigenschaften entsteht. Vor allem nachts in der kalten Jahreszeit macht sich dies sehr positiv bemerkbar. Bei Nutzerabwesenheit und geschlossener Außenfassade kann der Transmissionswärmeverlust deutlich gesenkt werden. Ansonst ist die Funktion der regulierbaren Hinterlüftung genauso wie bei Typ 2 mit Typ 4, und bei Typ 3 mit Typ 5 vergleichbar.

Typ 6 – Sonderformen, wie mehrgeschossige Doppelfassade mit Schachteffekt

Hauptsächlich handelt es sich um mehrgeschossige Doppelfassaden mit schachtartiger Konstruktion. Es gibt bereits einige mit diesem Konzept realisierte Großprojekte. Zu den allgemein bekannten Problemen gehören hier die starke Überhitzung im Sommer und in der sonnigen Übergangsjahreszeit, und die Geruchsübertragung durch die sogenannte Reinfiltration von Geschoss zu Geschoss infolge des durch die Höhe bedingten thermischen Auftriebs. Ein weiteres Problem ist starke Verrauchung über mehrere Geschosse im Brandfall, sofern eine horizontale Abschottung im Fassadenzwischenraum nicht ausgeführt ist.

5.4.3 Jahreszeitliche Betrachtungsweise bei Doppelfassade

Allgemein

Während einschalige Fassaden bei veränderten Wettersituationen thermisch relativ einfach analysiert werden können, weisen die Doppelfassaden komplexere Verhaltensmuster auf. Es verändert sich die thermische Wirkung und die Strömungsrichtung im Doppelfassadenzwischenraum und Innenraum je nach Fassadeneinstellung, -gestaltung und Wettersituation.

Neben der Gestaltung der Außenfassade spielt der Sonnenschutz, der meistens zwischen beiden Fassaden integriert wird, eine wichtige Rolle. Grundsätzlich ist eine bewegliche Sonnenschutzeinrichtung mit variabler Einstellbarkeit aufgrund seiner aufwendigeren Konstruktion, und Wartung kostenintensiver, als ein starres System. Abgesehen von den höheren Kosten bietet eine Doppelfassade jedoch mit beweglichem Sonnenschutz viele verschiedene Einstellvariationen für unterschiedlichste Außenbedingungen und kann somit flexibler auf veränderte Außenbedingungen reagieren als eine einschalige Fassade.

Raumluftwechsel bei einer Doppelfassade

Untersuchungen zum Raumluftwechsel (LW) wurden von C. Nolte durchgeführt [38]. Dabei wurde der LW bei realisierten Doppelfassaden mit permanenter Hinterlüftung gemessen. Zwei ausgewählte Räume mit unterschiedlichen Flächen, jeweils 28 und 131 m², wurden wöchentlich zwischen September 1997 und August 1998 gemessen. Insgesamt erfolgten 40 Messreihen. Die Messungen wurden bei gekippter Fensterstellung während des laufenden Geschäftsbetriebes durchgeführt.

Bei dem nach Osten ausgerichteten kleinen Messraum mit zwei Personen liegen alle gemessene Luftwechselzahlen zwischen 1 und 5fach. Durchschnittlich beträgt der Wert einen 4,25. Beim nach Süden ausgerichteten großen Messraum mit vierzehn Personen und 131 m² beträgt der durchschnittliche Wert des Luftwechsels 3,43.

Aufgrund dieses Ergebnisses kann festgestellt werden, dass eine sinkende Luftwechselrate bei abnehmender Temperaturdifferenz zwischen außen und innen im Sommer gegenüber dem Winter nicht gemessen wurde. Z. B. betrug die durchschnittliche Luftwechselrate im großen Messraum während der Heizperiode 3,62 gegenüber sonst 3,23fach. Ausreichende Luftwechselraten konnten also bei der Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung ganzjährig beobachtet werden.

Winter

Im Winter wird der Unterschied zwischen einschaligen Fassaden und Doppelfassaden vor allem bei der Lüftungsmöglichkeit am deutlichsten. In der Abbildung 12 wird gezeigt, wie sich die Doppelfassade von der einschaligen unterscheidet [39]. Bei der einschaligen Fassade ist die Zuluft die Außenluft. Die kalte Außenluft strömt im unteren Bereich des Fensters in den Raum ein, so dass das Raumklima infolge von Zegerscheinung unbehaglich sein kann. Die warme Abluft strömt im oberen Bereich des Fensters nach außen ab. (siehe „einschalige Fassade“ von Abbildung 13) Bei Doppelfassaden ist die Zulufttemperatur die mittlere Temperatur des Fassadenzwischenraums, da sich die kalte Außenluft im Fassadenzwischenraum durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. Das rechte Bild von Abbildung 12 zeigt die Auswirkung. Dabei reduziert sich das Zegerscheinungsrisiko im Innenraum gegenüber der einschaligen Fassade. Diese vorerwärmte Außenluft reduziert zusätzlich Lüftungswärmeverluste Q_v . Durch die Erwärmung an sonnigen Tagen reduzieren sich auch die Transmissionswärmeverluste Q_t .



Abbildung 12: Winterlicher Strömungsvergleich
zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden, Quelle [39]

Die Wirkung der Doppelfassade ist im Winter abhängig von ihrer grundsätzlichen Konzeption. Die Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung (Typ 1) ist als problematisch zu betrachten, weil die vorgewärmte Außenluft auch bei geschlossener Innenfassade grundsätzlich nach außen abströmt. Dies ist

5 Doppelfassade

unvorteilhaft, weil die im Fassadenzwischenraum passiv gewonnene Energie wieder verloren geht. Für den Winterfall sind die Doppelfassaden der Typen 2 bis 5 am besten geeignet, die regulierbar und verschließbar sind. Die ideale Einstellung dieser Doppelfassaden besteht im Winter aus einer offenen Zuluftöffnung und einer geschlossenen Abluftöffnung. So entsteht eine Mischung zwischen Zulufttemperatur und Raumlufttemperatur. Hier kann ein Induktionseffekt erwartet werden. Somit kann der Wärmeverlust durch Lüftung minimiert werden, während die bei Sonnenschein gewonnene Wärme bei der ‚Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung‘ durch die offene Abluftöffnung oben ständig verloren geht. (siehe mittleres Bild ‚Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung‘ bei Abbildung 13)

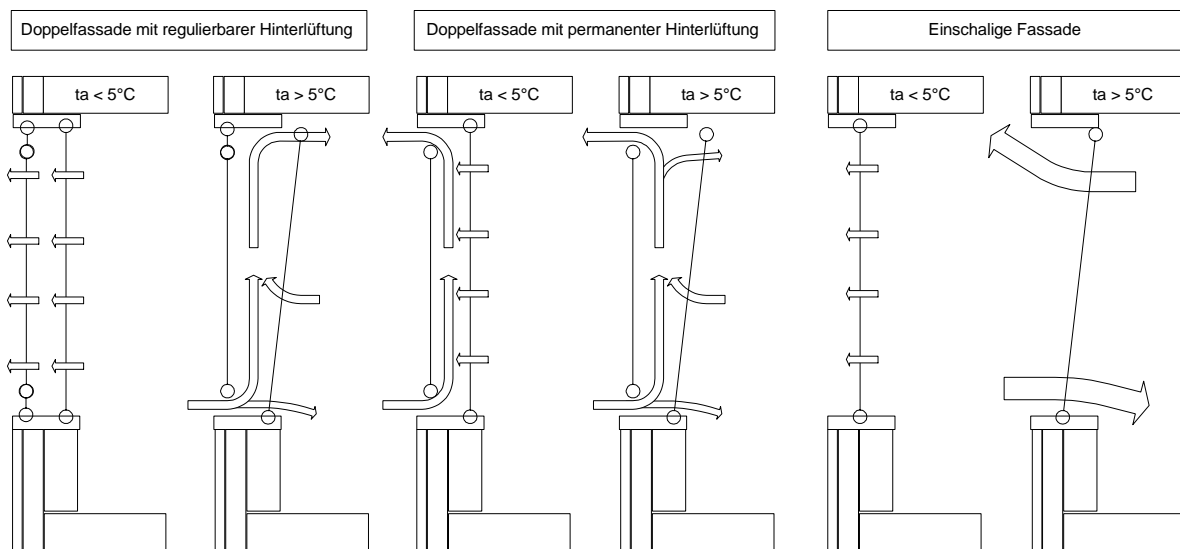


Abbildung 13: Einstellungsmöglichkeiten der verschiedenen Fassaden und Auswirkung im Winter

Übergangszeit

In der Übergangszeit kann eine Fensterlüftung sowohl bei der einschaligen als auch bei der doppelschaligen Fassade problemlos erfolgen. Wenn die Sonne stark scheint, können allerdings die Raumtemperaturen bei der einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz und der Doppelfassade von Typ 1 schnell außerhalb der Behaglichkeitsgrenze liegen. Bei der Doppelfassade von Typ 1 kann eine Überhitzung im Fassadenzwischenraum vermieden werden, wenn ein ausreichender Volumenstrom im Fassadenzwischenraum gewährleistet ist. Deshalb sollte die Doppelfassade eine ganz oder zum großen Teil öffnbare Außenfassade (Typ 3 und 5) haben. So kann eine Überhitzung im Fassadenzwischenraum vermieden werden.

Sommer

Die Außentemperatur liegt tagsüber im Sommer bei Gebäuden mit Nachtauskühlung und Speicherfähigkeit häufig über der Raumtemperatur. Die Sonnenstrahlung belastet den Raum zusätzlich. Im Sommer ist daher eine optimale Abschirmung des Gebäudes immer sinnvoll. Besonders bei den extremgemäßigten Klimaregionen ist die Außentemperatur tagsüber viel höher, so dass die Außenluft als Zuluft nicht verwendet werden kann. Aus diesem Grund ist die Wirkung von Doppelfassaden im Sommer schlechter als die von einschaligen Fassaden. Die Temperatur im Fassadenzwischenraum kann bei starker Sonnenstrahlung mehr als 50°C betragen, wodurch eine Fensterlüftung überhaupt nicht möglich ist. Meistens ist die Temperatur an der Oberfläche des geschlossenen Sonnenschutzes am höchsten, da er die meiste Sonneneinstrahlung absorbiert. Der Fassadenzwischenraum wird durch die langwellige sekundäre Wärmeabgabe der Glasoberflächen und des Sonnenschutzes überhitzt. Damit reduziert sich die Nutzungsdauer der Fensterlüftung in dieser Zeit drastisch. Bei den Doppelfassaden vom Typ 1, 2 und 4 trifft diese Aussage zu. Bei den Doppelfassaden von Typ 3 und 5 kann das Verhalten im Sommer auch als positiv bewertet werden. Da die Außenfassade bei den Typen 3 und 5 ganz offenbar ist, besteht keine Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum, und der Fassadenzwischenraum bildet keine Temperaturübergangszone mehr aus. Bei der ganz geöffneten Außenfassade funktionieren diese Doppelfassaden wie eine einschalige Fassade mit Außensonnenschutz. Der gesamte Energiedurchlassgrad bei der Doppelfassade liegt niedriger als bei einschaliger Fassade. Die außen liegende einfache Sicherheitsverglasung hat meistens einen 80-90 % Transmissionsgrad. Dadurch reduziert sich die gesamte Strahlungsintensität, die den Sonnenschutz erreicht. Daher kann ein bis 10 % geringerer Gesamtdurchlassgrad bei diesen Doppelfassaden gegenüber einer einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz erzielt werden. Dies bedeutet geringeren Kühlbedarf. Aus diesem Grund sollte eine Doppelfassade eine zum großen Teil oder ganz offenbare Außenfassade von Typ 3 und 5 für den sommerlichen Einsatz haben, damit die Wirkung dieser Doppelfassade im Sommer maximiert werden kann. In der Abbildung 14 ist die sommerliche Wirkung infolge der unterschiedlichen Größen der Außenöffnungen bei Doppelfassaden deutlich erkennbar. Trotzdem hat die Doppelfassade vom Typ 1 mit oberen und unteren Öffnungsquerschnitten von 15 cm Breiten (10 % bezogen auf die Fassadenfläche) bei der solaren Einstrahlung von 600 W/m² eine Durchströmung von ca. 50 m³/h je m² Fassadenfläche. Bei einer Fassadentiefe von 50 cm entspricht dies einem 100fachen Luftwechsel im Fassadenzwischenraum [40].

5 Doppelfassade

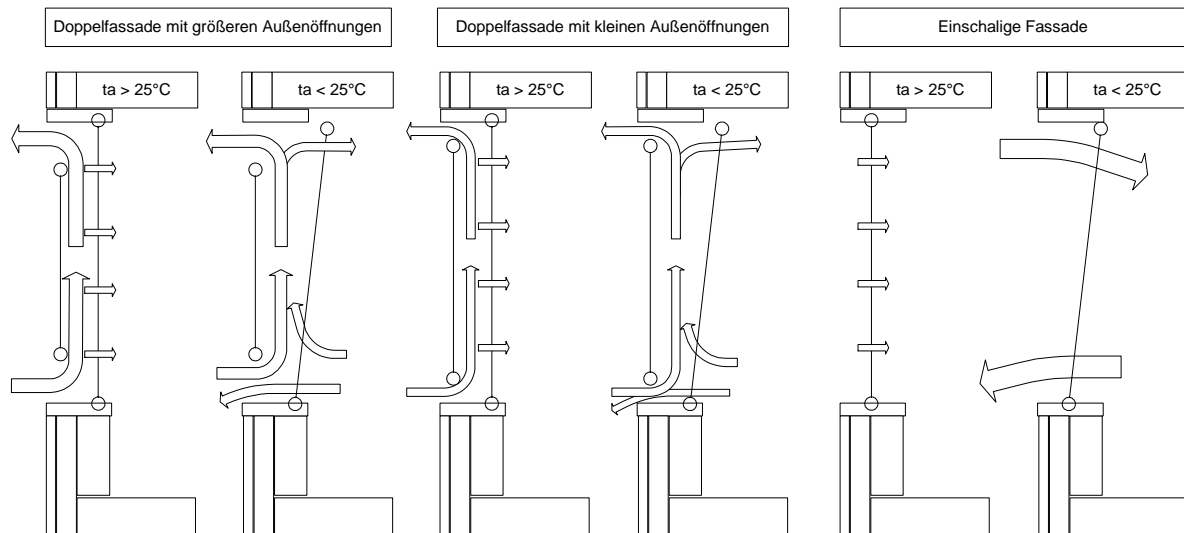


Abbildung 14: Einstellungsmöglichkeiten der verschiedenen Fassaden und Auswirkung im Sommer

Um die tagsüber dem Raum durch Sonneneinstrahlung zugeführte Energie wieder abzuführen, sollte der Raum nachts bei geöffnetem Fenster gekühlt werden können. Dieser wichtige Beitrag wurde bereits systematisch nachgewiesen, dabei ist der Unterschied in der energetischen Wirkung zwischen leichter und schwerer Bauweise bei Nachtkühlung sehr groß [5]. Bei Doppelfassaden ist im Sommer positiv zu sehen: die vorlagerte Außenscheibe infolge Schutz sowohl vor Witterung als auch Einbruch und ermöglicht sichere Nachtkühlung. Dieser Aspekt ist insofern sehr wichtig, da bei der einschaligen Fassade ohne zentral steuerbaren Antrieb der Öffnungsflügel eine optimale Gebäudenachtkühlung sehr schwierig ist. Hingegen kann sie bei Doppelfassaden ohne Automatisierung des Innenfensters problemlos erfolgen. Ein Gebäude mit Doppelfassade sollte dabei möglichst schwer, also gut wärmespeichernd, gebaut werden.

5.4.4 Grundlage zur Berechnung der Wärmebilanz der Doppelfassade

Wärmeübertragung – allgemein

Unter Wärmeübertragung wird der Transport von Wärme durch Leitung, Konvektion und Strahlung verstanden. Sie wird wie folgt definiert [3].

Wärmeleitung

Die Wärme wird innerhalb eines Körpers von Teilchen zu Teilchen durch die intermolekularen Wechselwirkungen weitergeleitet. Die Teilchen befinden sich zueinander in Ruhe.

Konvektion

Die Wärme fließt von einem bewegten Medium (Flüssigkeit oder Gas) an einen festen Körper oder umgekehrt, z. B. von Luft an eine Wand. Die Teilchen befinden sich zueinander in Bewegung.

Strahlung

Die Wärmestrahlung stellt einen Energietransport durch elektromagnetische Wellen dar. Die Wärmeübertragung erfolgt von einem Körper zum anderen ohne materielle Träger.

Für die Berechnung der Wärmeübertragung einer Glasfassade sind Konvektion und Strahlung maßgeblich. Je mehr die Glasoberfläche Strahlung absorbiert, desto mehr steigt die Oberflächentemperatur. Mit der steigenden Oberflächentemperatur steigt die sekundäre Wärmeabgabe. Mit den folgenden Berechnungen können sowohl der Strahlungsanteil als auch der konvektive Anteil für die Berechnung des gesamten g-Wertes der Doppelfassade berücksichtigt werden. Dieser Vorgang gilt aber nur im stationären Fall.

Vereinfacht kann der Wärmestrom infolge Strahlung zwischen 2 unendlichen parallelen Flächen durch die Definition eines Strahlungswärmeübergangskoeffizienten α_{st} berechnet werden.

$$\alpha_{st} = \frac{\left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}{T_1 - T_2} \times C_{12} \quad (9)$$

T_1 und T_2 : Absolute Oberflächentemperatur (K)

C_{12} : Strahlungskoeffizient zwischen Fläche 1 und 2 $W/(m^2 K^4)$

$$C_{12} = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)} \quad (10)$$

C_1 : Strahlungskoeffizient der Fläche 1 $W/(m^2 K^4)$

C_2 : Strahlungskoeffizient der Fläche 2 $W/(m^2 K^4)$

C_s : Strahlungskoeffizient eines absoluten schwarzen Körpers $W/(m^2 K^4)$

Bei freier Konvektion im Turbulenzbereich kann α_{Kon} für den Wärmeübergang berechnet werden.

5 Doppelfassade

$$\alpha_{\text{Kon}} = 9,73 \sqrt{\frac{t_o - t_L}{T_o}} \quad (11)$$

t_o : Oberflächentemperatur (°C)
 T_o : Absolute Oberflächentemperatur (°C)
 t_L : Lufttemperatur (°C)

Mit (9) und (11) können die Wärmeströme Q_{st} und Q_k gemäß der allgemeinen Wärmeübergangsgleichung berechnet werden.

$$Q_{\text{st}} = \alpha_{\text{st}} \times A \times (t_1 - t_2) \quad (12)$$

$$Q_{\text{kon}} = \alpha_{\text{kon}} \times A \times (t_o - t_L) \quad (13)$$

A : Flächengröße (m²)
 t_1 : Oberflächentemperatur von Fläche 1 (°C)
 t_2 : Oberflächentemperatur von Fläche 2 (°C)
 t_o : Oberflächentemperatur (°C)
 t_L : Lufttemperatur (°C)

Berechnung der gesamten Wärmeabgabe im Fassadenzwischenraum durch eine Kühllastberechnung im Fassadenzwischenraum

Die Geschwindigkeit der Luft an den Lüftungsschlitzen des Fassadenzwischenraumes kann über die Öffnungsgröße A_1 (unten), und A_2 (oben), der Höhe H zwischen beiden Öffnungen berechnet werden. Die Luftgeschwindigkeit w_2 am Austritt in der oberen Öffnung ist dann.

$$w_2 = \sqrt{\frac{H \times g \times \Delta t}{T_m \times \left(1 + \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}} \quad (14)$$

w_2 : Luftgeschwindigkeit in der Abströmöffnung (m/s)
 g : Fallbeschleunigung (m/s²)
 T_m : Mittlere absolute Temperatur im Raum (K)
 Δt : Temperaturdifferenz zwischen T_m und Außenlufttemperatur (K)
 H : Höhe zwischen Zu- und Abluftöffnung (m)

Die Geschwindigkeit und die Flächengröße ergeben dann den geförderten Volumenstrom. Danach ergibt sich weiter.

$$\dot{Q} = w_2 \times A_2 \times \rho \times c_p \times \Delta t \quad (15)$$

\dot{Q}	: Kühllast (kW)
w_2	: Luftgeschwindigkeit (m/s)
ρ	: Dichte (kg/m ³)
c_p	: Spezifische Wärmekapazität der Luft kJ/(m ³ K)
A_2	: Abströmöffnung (m ²)
Δt	: Temperaturdifferenz T_{Abluft} zwischen und Außenlufttemperatur (K)

Die Kühllast ist genau so groß, wie die in dem Fassadenzwischenraum freigesetzte Wärme. Aus den Gleichungen kann die Übertemperatur Δt ermittelt werden, wenn $A_1 = A_2$ in m_2 hier angenommen wird.

$$\Delta t = 0.033 \sqrt[3]{\frac{\dot{Q}^2}{A_2 * H}} \quad (16)$$

Die Temperaturdifferenz bzw. Übertemperatur im Zwischenraum ist abhängig von der Kühlleistung \dot{Q} , der Ein- und Austrittsfläche A , und der Höhe H . Je größer \dot{Q} , und je kleiner A und H sind, desto größer ist Δt . 50 °C oder mehr können daher die Temperaturen im Zwischenraum der Doppelfassade im sonnigen Sommer erreichen.

Berechnung der konvektiven Wärmeabgabe zwischen senkrechten Platten (Wände) durch Nusseltzahlgleichung [3], [41]

Der konvektive Wärmestrom von der Glasoberfläche zum Zwischenraum der Doppelfassade berechnet sich über:

$$\dot{Q}_{\text{kon}} = \alpha_{\text{kon}} \times A \times (t_G - t_L) \text{ oder } \dot{q}_{\text{kon}} = \frac{\dot{Q}_{\text{kon}}}{A} = \alpha_{\text{kon}} \times (t_G - t_L) \quad (17)$$

\dot{Q}	: Konvektiver Wärmestrom (W)
\dot{q}	: Konvektive Wärmestromdichte (W/m ²)
t_G	: Temperatur der Glasoberfläche (°C)
t_L	: Temperatur der Luft (°C)

5 Doppelfassade

α_k	: Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient $W/(m^2K)$
$1/\alpha_k$: Konvektiver Wärmeübergangswiderstand $(m^2K)/W$
A	: Fläche (m^2)

Der Wärmeübergangskoeffizient α hängt von zahlreichen Parametern ab. Dazu gehören Temperatur, Geschwindigkeit, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Strömungsart, Geometrie der Wand usw.. In diesem Fall wird eine freie Strömung in der Doppelfassade angenommen, die durch Dichteunterschiede infolge von Temperaturunterschieden der Luft entsteht. Die Berechnung von α erfolgt über die Ähnlichkeitstheorie mit der Nusseltgleichung. Zunächst kommen die Definitionen und die Anwendungsbereiche der dimensionslosen Zahlen [42].

Die Nusselt-Zahl Nu ist eine dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs. Je größer die Nusselt-Zahl ist, desto besser ist der Wärmeübergang.

$$Nu = \frac{q_w \times L}{\lambda \times \Delta T} = \frac{\alpha_k \times L}{\lambda} \quad (18)$$

Nu	: Nusselt-Zahl
q_w	: Wärmestromdichte an der Wand (W/m^2)
L	: charakteristische Länge (m)
λ	: Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
ΔT	: charakteristische Temperaturdifferenz (K)
α_k	: Wärmeübergangskoeffizient (W/m^2K)

Die Grashof-Zahl Gr beschreibt die thermischen Auftriebseffekte aufgrund von Dichtunterschieden, die eine Folge von Temperaturunterschieden sind.

$$Gr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times L^3}{\nu^2} \quad (19)$$

Gr	: Grashof-Zahl
g	: Fallbeschleunigung (m/s^2)
β	: isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient $(1/K)$
ΔT	: charakteristische Temperaturdifferenz (K)
L	: charakteristische Länge (m)
ν	: kinetische Viskosität (m^2/s)

Die Prandtl-Zahl Pr ist eine dimensionslose Kombination von Stoffwerten, die damit einerseits wiederum ein Stoffwert ist, andererseits aber auch als Kennzahl im Sinne der Dimensionsanalyse angesehen werden kann.

$$Pr = \frac{\eta \times c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (20)$$

Pr	: Prandtl-Zahl
η	: dynamische Viskosität (kg/ms)
c_p	: spezifische isobare Wärmekapazität (J/kg K)
λ	: Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
ν	: kinetische Viskosität $\nu = \eta / \rho$ (m ² /s)
a	: Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda / (\rho \times c_p)$ (m ² /s)

Mit diesen dimensionslosen Zahlen kann der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zum Doppelfassadenzwischenraum ermittelt werden. Die Sonnenschutzeinrichtung und die Glasscheibe werden hier als senkrechte Wände angenommen. Dann kann α_k für eine freie Strömung an senkrechten Platten bzw. Wänden mit der folgenden Gleichung ermittelt werden.

$$\alpha_k = \frac{Nu \times \lambda}{L} \quad \text{mit} \quad Nu = \left[0,825 + 0,387 \times Ra^{0,167} \times \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{0,563} \right]^{-0,296} \right]^2 \quad (21)$$

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{9,8 \times \Delta t \times H^3 \times Pr}{(t_\infty + 273) \times \nu^2} \quad (22)$$

t_∞	: Temperatur der unbeeinflussten Umgebung (°C)
Ra	: Rayleigh-Zahl
H	: Charakteristische Höhe (m)

Eine Bilanzierung der Wärmeübertragung in der Doppelfassade kann nach der Kühllastberechnung oder Nusseltzahlgleichung erfolgen. Während die Wärmeübertragung bei der Doppelfassade nach der Nusseltzahlgleichung (21) schwierig zu ermitteln ist, kann eine vereinfachte Wärmebilanz mit der Kühllastberechnung (15) hinreichend genau ermittelt werden.

5.5 Einsatzgrenzen der Doppelfassade

Wenn im Winter die Lufttemperaturen über 6 – 10 °C liegen, ist freie Lüftung möglich. Diese Temperaturzone kann durch einen passiven Solargewinn im Fassadenzwischenraum der Doppelfassade häufiger erreicht werden. Wenn die primäre Gebäudehülle schlecht gedämmt ist, kann mehr Heizenergie durch die Pufferzone der Doppelfassade eingespart werden [9]. Bei Gebäuden mit hoher thermischer Last liegt jedoch das Problem nicht in der winterlichen Heizlast sondern in der Kühllast im Sommer und in der sonnigen Übergangsjahreszeit. Bei nicht richtig konzipierten Doppelfassaden, wie bei Doppelfassaden mit permanenter Hinterlüftung mit unregulierbaren Öffnungsschlitz an der Außenfassade vom Typ 1, kann sich der Kühlbedarf durch die sich aufheizenden Außenwände [26] erhöhen. Dies betrifft aber ausschließlich den Hochsommer.

Es wird manchmal irrtümlich davon ausgegangen, dass die Doppelfassade als Klimafassade die Klimaanlage ersetzen kann. Gebäude mit Doppelfassaden benötigen auch eine Klimaanlage. Bei freier Lüftung sollte die gesamte thermische Last in den Räumen Werte von 40 W/m² nicht überschreiten [27]. Diesen Wert während des Sommers bei einem Gebäude mit hoher interner Last in der extremgemäßigten Klimazonen einzuhalten, ist unwahrscheinlich. In diesen Regionen ist daher eine Klimaanlage für Komfort für Personen unentbehrlich. Der Einsatz einer Doppelfassade hat in diesen Regionen hauptsächlich eine Betriebskostensenkung zur Folge.

5.6 Zusammenfassung

Eine Doppelfassade stellt eine ökologische und ökonomische Alternative zur einschaligen Fassade dar [43]. Damit sie sowohl im Winter als auch im Sommer optimal funktionieren kann, ist eine variable Einstellbarkeit der Doppelfassade Voraussetzung. Eine Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung und nicht regulierbarer Außenöffnungen ist ungeeignet. Die richtige Konstruktion einer Doppelfassade hängt auch von den jeweiligen regionalen Wetterbedingungen ab.

In kalten Regionen ist eine kleine permanent offene oder verschließbare Zuluftöffnung in der Doppelfassade ausreichend, um einen Raum natürlich zu belüften. Wenn aber das Klima von kalt bis mittelwarm charakterisiert wird, wie in der gemäßigten oder kontinentalen Klimazone, sind kleine öffnen- und verschließbare Zu- und Ablüftungsschlitze notwendig, damit der Fassadenzwischenraum als eine Pufferzone gemäß den unterschiedlichen Außenbedingungen flexibel eingestellt

werden kann. Wenn aber das Klima noch im Winter kälter und im Sommer wärmer ist, sollte der Fassadenzwischenraum am besten völlig verschließbar und gleichzeitig auch ganz öffnbar sein, damit die Doppelfassade vom Winter bis zum Hochsommer flexibel funktionieren kann. Notwendig ist eine Konstruktion, die die Außenluft im Winter ausreichend vorwärmt, nach innen einströmen lässt, und zugleich im Sommer die Sonneneinstrahlung draußen hält. Guten Beispiele sind in der Praxis selten. Die meisten Beispiele, die in Kapitel 6 betrachtet werden, erfüllen diese Anforderungen nur zum Teil.

In den ganzjährig warmen oder tropischen Regionen wäre auch eine gut konstruierte Doppelfassade trotzdem nicht sinnvoll [26]. Der Grund liegt darin, dass die winterlichen Vorteile der Doppelfassaden nicht gegeben sind. Außerdem belasten die hohe Außentemperatur und die starke Sonnenstrahlung das Gebäude ständig. Daher sollte ein Einsatz von Doppelfassaden in diesen Regionen nicht erfolgen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich der Einsatz von Doppelfassaden auf bestimmte Klimazonen beschränkt.

6 Untersuchung von Beispielen

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel geht es um eine Beispielsammlung und –analyse. Es werden insgesamt 13 vom Verfasser besichtigte Projekte mit Doppelfassaden in Deutschland behandelt.

Nach Oesterle sieht die Aufteilung der Fassaden folgendermaßen aus.

Kastenfenster (7 Projekte), Schacht-Kasten-Fassade (1 Projekt), Korridorfassade (4 Projekte), Mehrgeschossfassade (1 Projekt).

Nach der Methode des Verfassers sieht sie wie folgt aus.

Typ 1 – Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitz an der Außenfassade (5 Projekte)

Typ 2 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade (1 Projekt)

Typ 3 – Doppelfassade mit teilweise regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade (1 Projekt)

Typ 4 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade (3 Projekte)

Typ 5 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade (1 Projekt)

Typ 6 – Sonderformen, wie mehrgeschossige Doppelfassade mit Schachteffekt (2 Projekte)

Zuerst werden im Kapitel 6-2 die Konstruktionen der untersuchten Fassaden nach der Klassifikation des Verfassers beschrieben. Der Hauptgegenstand ist hierbei, die jeweilige Doppelfassadenkonstruktion richtig zu interpretieren und zu verstehen, wie sie in die Realität umgesetzt wurden. In Kapitel 6-3 werden sie ganzheitlich verglichen und beurteilt, z. B. wie effektiv die sommerliche Überhitzung im Fassadenzwischenraum vermieden wird und wie die Zulufttemperatur im Winter einreguliert werden kann. Obwohl ein beweglicher Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum keinen nennenswerten Einfluss auf den Luftwechsel haben sollte [44], wird zusätzlich die Position des Sonnenschutzes dahingehend überprüft, ob dieser eine ausreichende Hinterlüftung gewährleisten kann oder nicht. Dies ist wichtig, weil der Sonnenschutz viel Strahlung absorbiert und dadurch in dieser Ebene die höchste Temperatur herrscht [5]. Daher ändert sich gegebenenfalls die Strömungsrichtung im

Fassadenzwischenraum je nach der Positionierung des Sonnenschutzes [45]. Da die genauen Maße im Fassadenbereich schwer zu erhalten waren, wird der Öffnungsanteil der Außenfassade bezogen auf die gesamte Fassadenfläche grob dargestellt.

In Kapitel 6-3 werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Doppelfassaden von Typ 1 bis 6 dargestellt und zusammengefasst.

6.2 Klassifizierte Untersuchung von Beispielen

6.2.1 Typ 1 – Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitzten an der Außenfassade

Objekt 1 [46]

Das im Dezember 1996 fertiggestellte Gebäude ist 127 m hoch und hat 30 Obergeschosse und einen kreisförmigen Grundriss mit einem Durchmesser von 32 m. Die Bruttogeschossfläche (BGF) beträgt insgesamt 35000 m².

- Die Doppelfassade hat eine permanente Hinterlüftung mit einer Kastenfensterkonstruktion mit horizontaler Abtrennung.
- Der Abstand zwischen Außen- und Innenfassade beträgt 500 mm. Die Höhe zwischen Zu- und Abluftschlitzen, deren Größe insgesamt ca. 4% (2% Zu- und 2% Abluftschlitze) bezogen auf die gesamte Verglasungsfläche betragen, ist geschosshoch. Die Außenfassade besteht aus 10 mm dickem Einscheibensicherheitsglas und hat oben und unten versetzte Lüftungsschlitze. Obwohl diese Lüftungsschlitze strömungstechnisch optimiert wurden, sind die versetzten Zu- und Abluftöffnungen an der Außenfassade relativ klein gegenüber der gesamten Glasfassadenflächen. Die Innenfassade mit Schiebetür ist ein Wärmeschutzglas aus Climaplust Weißglas mit Zweischiebenisolierverglasung. Diese Schiebetür kann aus Sicherheitsgründen infolge zu hohen Luftwechsels und Zugerscheinung nur bis zu 13,5 cm manuell geöffnet werden. Die Gebäudenachtkühlung kann wegen der geringen Unwetterschutzes der Konstruktion sehr gut erfolgen.
- Im Fassadenzwischenraum sind die Aluminiumjalousien direkt vor der inneren Isolierverglasung angeordnet. Die Jalousien werden motorisch gesteuert und sind individuell von Nutzern oder automatisch von der Zentrale einstellbar.

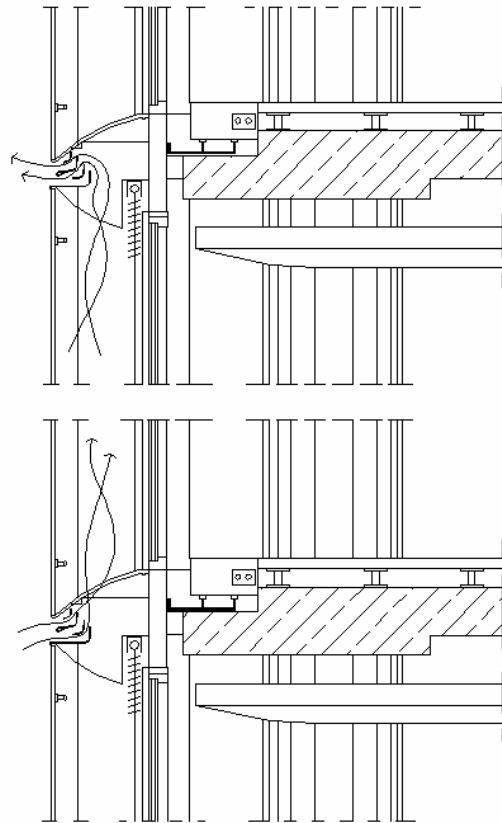


Abbildung 15: Fassadendetail und –außenansicht von Objekt 1

Objekt2 [47], [48]

Das Gebäude wurde im Jahr 1997 fertiggestellt. Das Gebäude hat 63 Geschosse mit 258,7 m Höhe. Die BGF beträgt insgesamt 110000 m².

- Die Doppelfassade hat eine permanente Hinterlüftung mit einer Kastenfensterkonstruktion, wobei keine horizontale Abtrennung vorhanden ist.
- Der Abstand zwischen Außen- und Innenfassade beträgt 220 mm. Die äußeren Lüftungsschlitze der Doppelfassade, die insgesamt ca. 14% (7% Zu- und 7% Abluftschlitze) bezogen auf die gesamte Verglasungsfläche bzw. 9% zu der gesamten Fassadenfläche betragen, sind oberhalb der Brüstung angeordnet. Die Abluftschlitze sind unter dem Deckenbereich. Beide Schlitze liegen übereinander. Die Außenfassade ist eine 8mm Einfachverglasung, und die Innenfassade besteht aus Drehkipp-Flügel-Fenstern mit isolierverglaster Wärmeschutzverglasung mit einem k-Wert von 1,3 W/(m²K). Die Fassadengestaltung ist strömungstechnisch optimiert.
- Bei dieser Fassade ist eine Gebäudeleittechnik integriert. Z.B. erkennt ein Sensor an der Decke, der einen Abstand von ca. 1,5 m zum Fenster hat, die Beleuchtungsstärke innen und reguliert dann die Helligkeit innen automatisch.

6 Untersuchung von Beispielen

Aufgrund der Gebäudeleittechnik kann die Gebäudenachtauskühlung sehr gut durchgeführt werden. Sie kann in der warmen Zeit immer optimal erfolgen. Das Fenster ist ab Außentemperaturen von 16 °C automatisch geschlossen. Die Kühldecke und die mechanisch unterstützte Lüftung werden bei geöffnetem Fenster automatisch abgeschaltet.

- Trotz des geringen Abstandes zwischen Außen- und Innenfassade ist der Sonnenschutz direkt hinter der Außenfassade positioniert. Dies erlaubt eine ausreichende Durchströmung hinter dem Sonnenschutz.

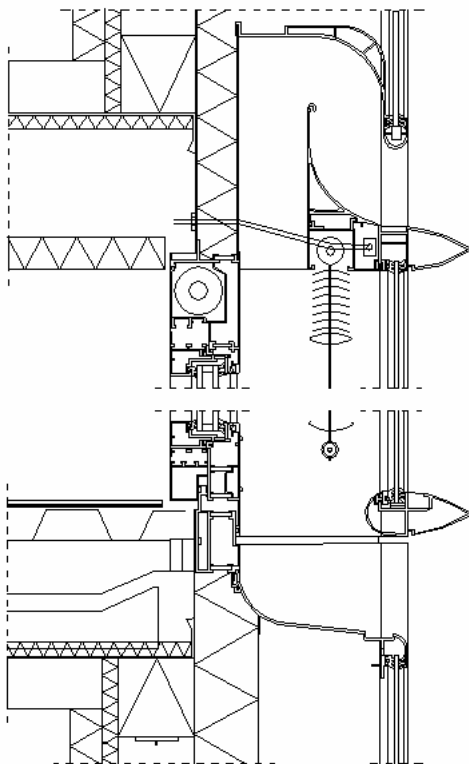


Abbildung 16: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 2

Objekt 3 [35]

Das Ende 2000 fertiggestellte Gebäude ist 134 m hoch und besteht aus 34 Stockwerken. Die BGF beträgt insgesamt 29.000 m² und pro Etage 960 m².

- Die hier gebaute Doppelfassade mit horizontaler Abtrennung ist mit einer permanenten Hinterlüftung konzipiert.
- Der Abstand beträgt 450 mm zwischen Außen- und Innenfassade. Der Abstand zwischen Zu- und Abluftschlitzen ist geschosshoch. Die Größe der Zu- und Abluftschlitze beträgt 10,5% (4% Zu- und 6,5% Abluftschlitze) der gesamten

6 Untersuchung von Beispielen

Fassadenfläche. Die Fassadenkonstruktion hat aufgrund der elementierten Bauweise einen extrem hohen Vorfertigungsgrad. Zu den konventionellen Doppelfassaden mit permanenter Hinterlüftung weist diese Konstruktion einen kleinen Unterschied auf. Jede zweite Achse hat eine öffenbare Innenfassade mit zwei oben und unten separat geteilten Öffnungsmöglichkeiten. Die obere Öffnung ist als großes Drehkippenfenster ausgeführt, und die untere als ein kleines Kippenfenster, das nach außen geöffnet wird. Dadurch bestehen je nach Wettersituationen verschiedene Möglichkeiten zum Belüften.

- Der Sonnenschutz ist hier fast in der Mitte zwischen Außen- und Innenfassade positioniert. Eine ausreichende Durchlüftung hinter dem Sonnenschutz ist möglich. Außerdem hat der Sonnenschutz als einziges von allen untersuchten Projekten eine Lichtlenkungsmöglichkeit. (siehe Abbildung 17.)

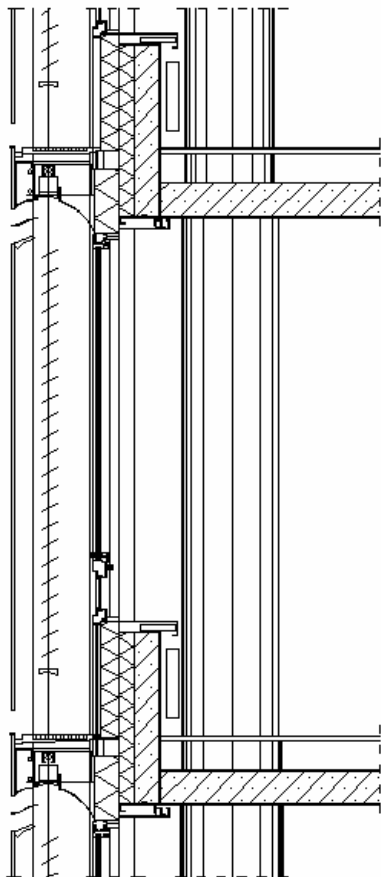


Abbildung 17: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 3

Objekt 4 [49], [50]

Das Gebäude, das im Juli 1998 fertiggestellt wurde, hat 29 Geschosse mit einer Gesamthöhe von 108,8 m. Die BGF beträgt insgesamt 72000 m², und sein Regelgeschoss ist 915 m² groß. Das runde Gebäude hat einen Durchmesser von 34,4 m.

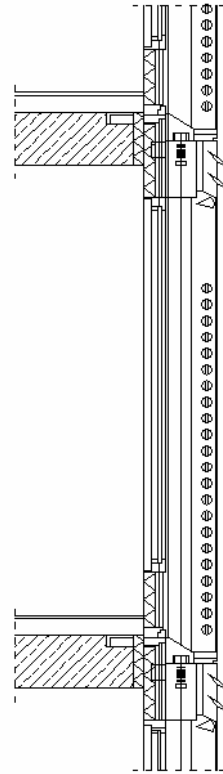


Abbildung 18: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 4

- Die konstruktive Logik in dieser Doppelfassade unterscheidet sich von denen mit konventioneller permanenter Hinterlüftung. Bei den meisten Doppelfassaden erfolgt die freie Strömung mit thermischem Auftrieb im Fassadenbereich von unten nach oben. Diese Fassade hat dagegen eine seitliche Zuluftöffnung. Die Außenluft strömt von der Seite ein und am oberen Bereich der Fassade aus. Die Größe der Ab- und Zuluftschnitte beträgt ca. 13% (2% Zu- und 11% Abluft-schnitte) bezogen auf die gesamte Fassadenfläche. Infolge dieser Konstruktionslogik ist eine horizontale Abtrennung zu den benachbarten Räumen nicht notwendig. Mit diesem Konzept kann außerdem die sogenannte Rezirkulationsgefahr der Abluft gegenüber der Doppelfassade mit unterer Zuluft und oberer Abluft reduziert werden. Die Rückströmung der Abluft beträgt weniger als 19 %, es sei denn, der Volumenstrom ist nicht regulierbar.
- Der Fassadenzwischenraum hat einen Abstand von 300 mm. Die Außenfassade ist aus Einfachsicherheitsverglasung mit 8 mm Dicke, und die Innenfassade ist ein Dreh-Kippfenster mit Isolierverglasung mit einem k-Wert von $1,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Im Fassadenzwischenraum liegen flexible perforierte horizontale Aluminiumlamellen, die motorisch individuell von Nutzern oder von der Zentrale automatisch gesteuert werden. Sie erlauben einen diffusen Sichtkontakt nach

6 Untersuchung von Beispielen

außen auch bei geschlossenem Zustand. Die Lamellen sind an der Innenverglasung platziert.

- Obwohl das Fenster nur manuell geöffnet werden kann, kann die Gebäudenachtkühlung infolge der wenig witterungsempfindlichen Konstruktion bei geöffneter Innenfassade problemlos erfolgen.

Objekt 5 [51]

Die BGF von diesem 16geschossigen Gebäude beträgt 11500 m² und pro Etage 525 m².

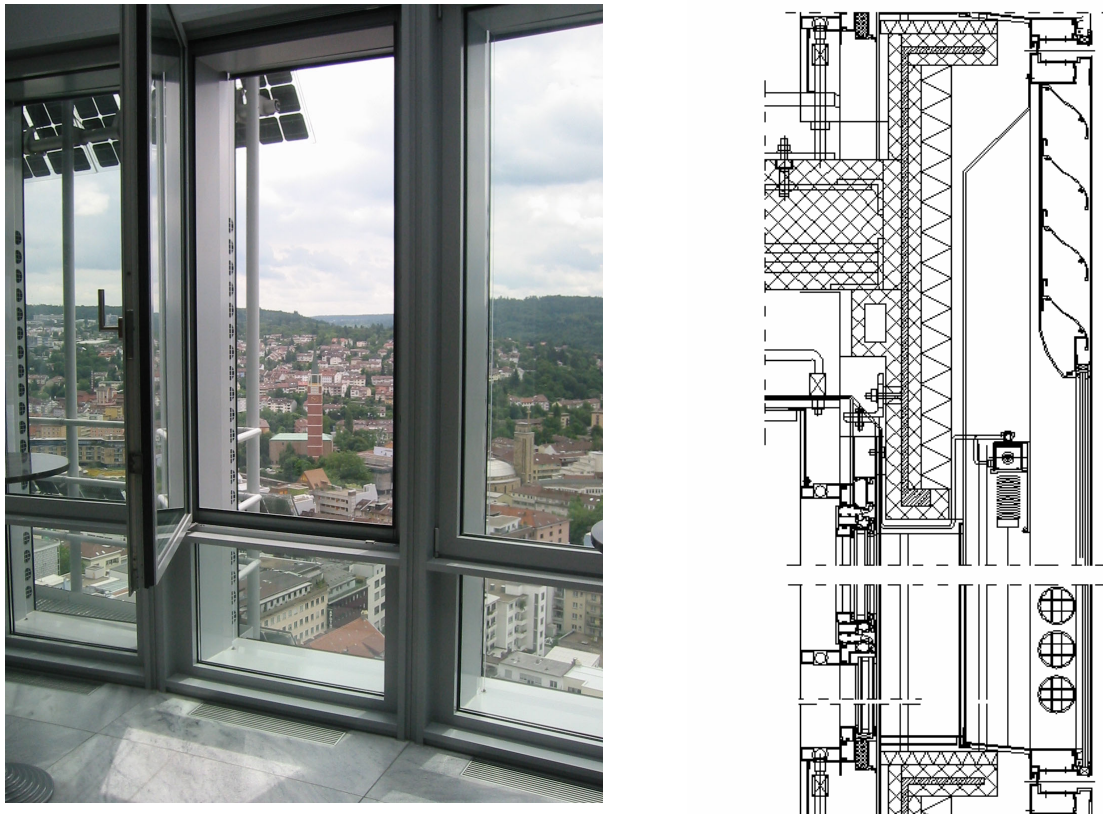


Abbildung 19: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 5

- Wie beim Objekt 4 hat die Doppelfassade eine nicht regulierbare permanente Hinterlüftung mit seitlicher Zuluftführung und oberer Ablüftung im Deckenstirnbereich. Daher ist eine horizontale Abtrennung zu den benachbarten Räumen nicht notwendig, wie bei Objekt 4. Die Abluftöffnung besteht aus waagerechten Lamellen. (siehe Abbildung 19.)
- Gegenüber Objekt 4 ist in diesem Projekt verbessert, dass die Fensterkonstruktion aus einem Fassadenelement mit einer Breite von 1350 mm aufgebaut ist und die Größe der Ab- und Zuluftschlitze ca. 14,5% (3,5% Zu- und 11% Abluftschlitze) bezogen auf die gesamte Fassadenfläche beträgt. Dadurch ermöglichen die Zuluftöffnungen einen leicht größeren Volumenstrom zum

6 Untersuchung von Beispielen

Fassadenzwischenraum. Dies ist im Sommer und in der Übergangszeit von Vorteil.

- Die Außenfassade besteht aus Einscheibensicherheitsverglasung als Wetterschutz und als Klimapuffer. Die Innenfassade besteht aus einem Wärmeschutzglasfenster mit Dreh-Kippflügeln. Gegenüber den konventionellen Doppelfassadensystemen sind Heiz- und Kühlprofile in der Fassade integriert.
- Der Sonnenschutz ist in der Mitte des Fassadenzwischenraumes positioniert. Die Hinterlüftung ist daher gut gewährleistet.

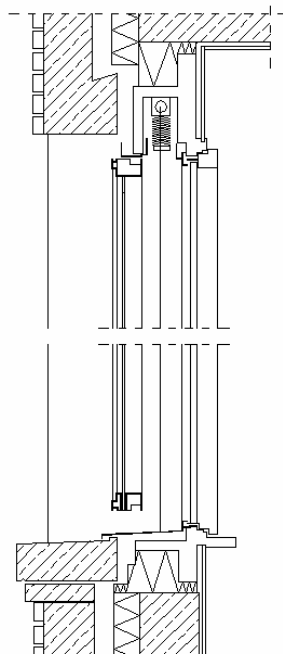
6.2.2 Typ 2 – Doppelfassade mit z. T. regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade

Objekt 6 [35]

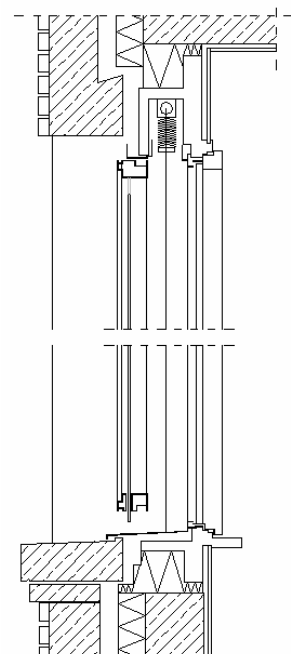
Das im Jahr 1999 fertiggestellte 100 m hohe Gebäude hat eine typische Lochfassade. Die BGF beträgt 31700 m².



Innenansicht;
beide Fenster offen



Winterfall;
Außenfenster nach oben gezogen



Sommerfall;
Außenfenster nach unten gezogen

Abbildung 20: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 6

- Die Doppelfassade hat eine permanente aber regulierbare Hinterlüftung mit einer Lochfassade.
- Der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade beträgt 220 mm. Die Innenfassade ist ein Dreh-Kippflügel mit Wärmeschutzverglasung in einem Eichholzrahmen mit äußeren Aludeckleisten. Die äußere Fassade ist ein Drehflügel,

der eine vertikal verschiebbare Konstruktion hat. Die Größe der Ab- und Zuluftschlitze kann daher von ca. 6% (6% Zu- und 0% Abluftschlitze) im Winter bis 11,3% (6% Zu- und 5,3% Abluftschlitze) in der Übergangszeit und dem Sommer bezogen auf die gesamte Verglasungsfläche variieren. Außerdem können die Außen- und Innenfenster gleichzeitig nach innen geöffnet werden. Dazwischen befindet sich ein Lamellenraffstore. Am äußeren Drehflügel befindet sich unten ein 60 mm hoher Zuluftschlitz und oben ein 50 mm hoher Abluftschlitz. Dadurch erfolgt in der Übergangszeit und im Sommer Fensterlüftung. Im Winter erfolgt eine prinzipielle Veränderung der Außenfassade. Eine Hubmechanik schiebt den äußeren Flügel nach oben, damit der obere Abluftschlitz in dieser Zeit geschlossen bleibt. Dies hat zur Folge, dass die Doppelfassade im Winter nur offene Zuluftschlitze hat, die gegenüber dem Sommerfall vergrößert sind. Damit kann die Ausströmung der im Fassadenzwischenraum erwärmten Luft verhindert werden und gleichzeitig der winterliche Lüftungseffekt verbessert werden. (siehe Abbildung 20.)

- Eine gute Durchströmung hinter dem Sonnenschutz ist fraglich, da der Sonnenschutz im sehr engen Fassadenzwischenraum zwischen Außen- und Innenfassade positioniert ist.

6.2.3 Typ 3 – Doppelfassade mit z. T. regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade

Objekt 7 [35], [52]

Der gesamte Gebäudekomplex ist im Oktober 1997 fertiggestellt worden, und die BGF beträgt insgesamt 44000 m². Das Gebäude mit 21 Geschossen ist 85 m hoch.

- Die Doppelfassade, die nur in West- und Südorientierung ohne horizontale Abtrennung gebaut ist, hat außen liegende bewegliche Glaslamellen als äußere Fassadenhaut. Damit ist die permanente Hinterlüftung regulierbar.
- Die raumhohe Außenfassade mit acht übereinanderliegenden Glaslamellen ist aus 12 mm dickem Verbundsicherheitsglas und bis zu 70° aufklappbar. Durch diese Konstruktion kann die Außenfassade ca. 9% im Winter bis 86% im Sommer zu den gesamten Fassadenflächen geöffnet werden. Der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade beträgt 60 cm. Drei Lamellengruppen werden zusammen mit einem Elektromotor betrieben. Die Innenfassade mit Drehkippenfenster und Oberlicht ist aus 38 mm dickem Isolierglas aufgebaut. Während das Oberlicht motorisch angesteuert wird, wird das Drehkippenfenster manuell betrieben. Durch das motorisierte Oberlicht wird im Sommer eine optimale Gebäudenachtkühlung gewährleistet.

6 Untersuchung von Beispielen

- Im Winter werden die Glaslamellen geschlossen. Sonst sind sie teilweise oder ganz geöffnet. Beim ganz geöffneten Zustand der Außenglaslamellen fällt der thermische Einfluss durch die Sonnenstrahlung sehr gering aus. Beim geschlossenen Stand im Winter wird diese Lamellenkonstruktion eine kleine Hinterlüftung im Fassadenzwischenraum durch Fugen mit einer Breite von ca. 40mm zwischen acht Glaslamellen erlauben. Infolge des Temperaturunterschiedes zwischen innen und außen im Winter kann aber der Volumenstrom im Fassadenzwischenraum relativ groß sein.
- Die Steuerung von Glaslamellen, Sonnenschutz und Oberlicht wird vom Gebäudeleitsystem mit z.B. Temperaturfühler und Windsensoren überwacht. Bei einer Windgeschwindigkeit von mehr als 7 m/s bleiben die Lamellen geschlossen.
- Weil die Außenfassade ganz geöffnet werden kann, erfolgt die Hinterlüftung hinter dem Sonnenschutz problemlos.

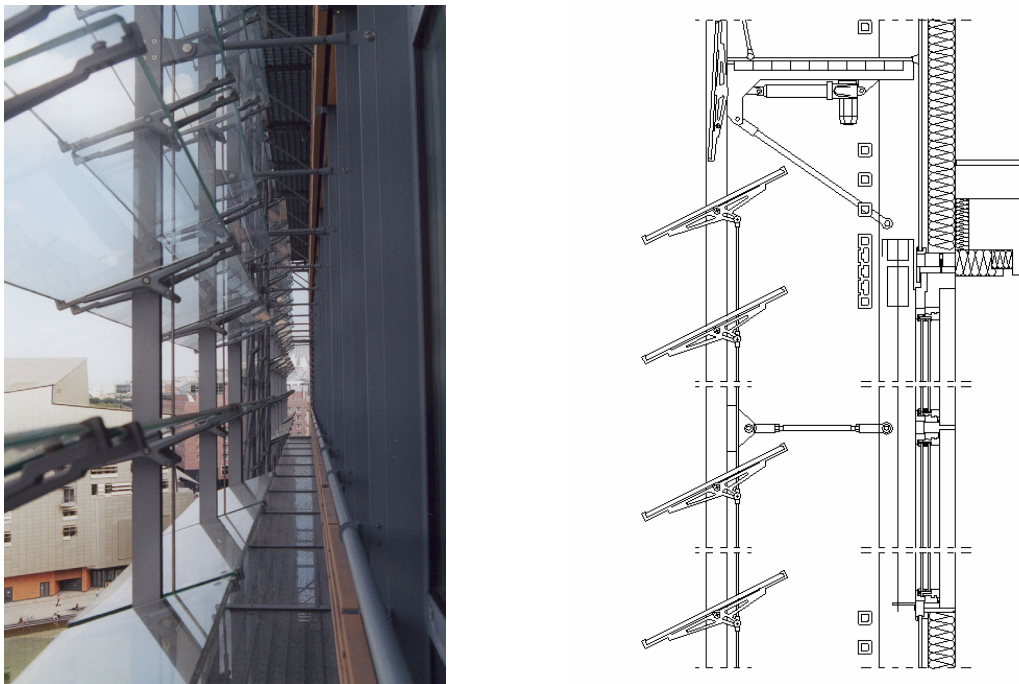


Abbildung 21: Fassadendetail und -innenansicht von Objekt 7

6.2.4 Typ 4 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade

Objekt 8 [53]

Das 49 m hohe Gebäude mit 12 Geschossen hat einen Grundriss von 37 m * 37 m. Die BGF beträgt insgesamt 16200 m². Im Inneren befindet sich ein gebäudehohes Atrium.

6 Untersuchung von Beispielen

- Die Doppelfassade hat eine steuerbare Hinterlüftung mit z. T. öffnbarer Außenfassade. Zwei Fassadenachsen bilden eine Einheit. Bei einer der Fassadenachsen ist eine Zuluftöffnung unten und bei der anderen eine Abluftöffnung oben integriert. Es handelt sich um eine versetzte Luftführung. Die Größe der Ab- und Zuluftschnitte variiert von ca. 0% im Winter bis 26,6% (13,3% Zu- und 13,3% Abluftschnitte) im Sommer bezogen auf die gesamte Fassadenfläche.
- Der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade beträgt ca. 460 mm. Die Außenfassade besteht aus einer Sicherheitseinfachverglasung, die den Witterungsschutz bietet. Die Höhe zwischen Zu- und Abluftschnitten ist raumhoch. Die Steuerung der Luftklappen ist individuell durch den Nutzer oder über die Zentrale möglich. Die Innenfassade ist ein raumhohes Schiebetürsystem mit Isolierverglasung. Im Sommer sind die beiden Öffnungen ganz offen und erlauben eine maximale Durchlüftung. Im Winter ist die untere Zuluftöffnung offen und die obere Abluftöffnung geschlossen. Dadurch kann der winterliche Induktionseffekt maximiert werden. Die Gebäudenachtkühlung kann durch die Leittechnik gesteuert werden.
- Der Sonnenschutz, der sich im Fassadenzwischenraum befindet, ist direkt vor der inneren Isolierverglasung positioniert. Eine gute Durchströmung hinter dem Sonnenschutz ist daher fraglich.

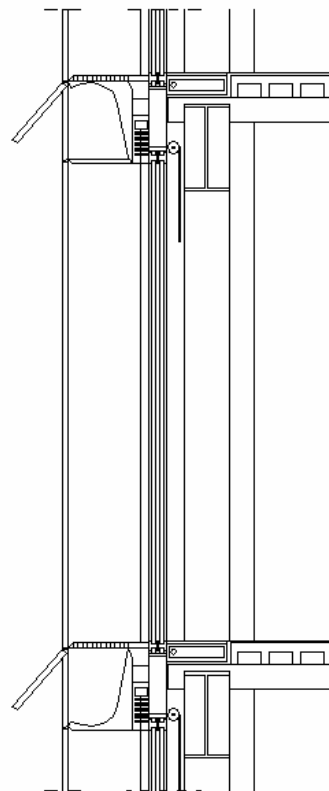


Abbildung 22: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 8

Objekt 9 [35], [54]

Das im Jahr 1997 fertiggestellte Gebäude hat 20 Geschosse und ist 75 m hoch. Die BGF beträgt 41000 m² bei einer Regelgeschossfläche von 750 m². Das Gebäude hat einen rhombischen Grundriss, und ein 56 m hohes Atrium in der Gebäudemitte.

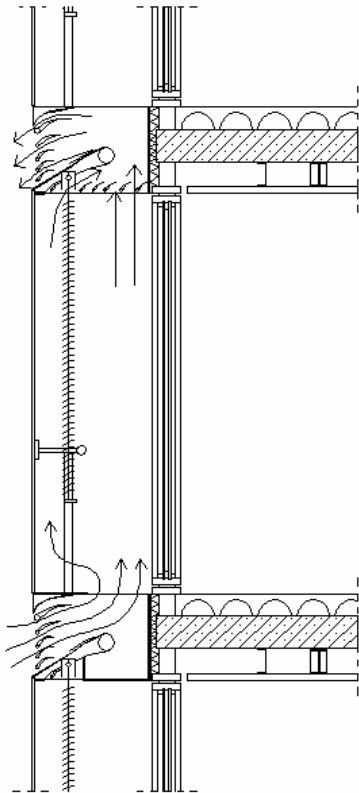


Abbildung 23: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 9

- Diese Doppelfassade hat eine regulierbare Hinterlüftung mit z. T. öffentlicher Außenfassade mit versetzten unteren Zuluft- und oberen Abluftöffnungen, die insgesamt ca. 0 % im Winter bis 17 % (8,5% Zu- und 8,5% Abluftschnitte) im Sommer bezogen auf die gesamte Fassadenflächen geöffnet werden können. Eine horizontale Abtrennung zu den benachbarten Räumen ist nicht vorhanden.
- Der Abstand zwischen Außen- und Innenfassade beträgt 1,40 bzw. 0,90 m. Die Außenfassade hat eine 12 mm starke Einfachverglasung, und die Innenfassade hat eine Zweifachisolierverglasung aus Wärmeschutzglas und ist als manuell öffentlicher Wendeflügel ausgeführt. Bei geschlossener Außenfassade beträgt der k-Wert 1,10 W/(m²K). Wenn eine Fensterlüftung an kalten Tagen erfolgen soll, wird die Zuluft im Fassadenzwischenraum erwärmt nach innen geführt. Hierfür ist nur das Öffnen der unteren Zuluftöffnung ausreichend. Sonst werden die Öffnungsschnitte oben und unten geöffnet. In diesem Fall kann der innere

6 Untersuchung von Beispielen

Wendeflügel ganz geöffnet werden. Infolge der zentralen Steuerungsmöglichkeiten ist die Gebäudenachtkühlung gut.

- Die hochreflektierenden Aluminiumlamellen werden motorisch gesteuert und sind individuell von Nutzern oder automatisch von der Zentrale einstellbar. Weil der Abstand zwischen Außen – und Innenfassade groß genug ist, und der Sonnenschutz an der äußeren Verglasung positioniert ist, kann die Durchströmung hinter dem Sonnenschutz gut erfolgen.

Objekt 10 [55]

Das 82 m hohe Gebäude mit quadratischem Grundriss wurde Anfang 1999 fertiggestellt, und hat 20 Obergeschosse. Die BGF beträgt 13563 m².

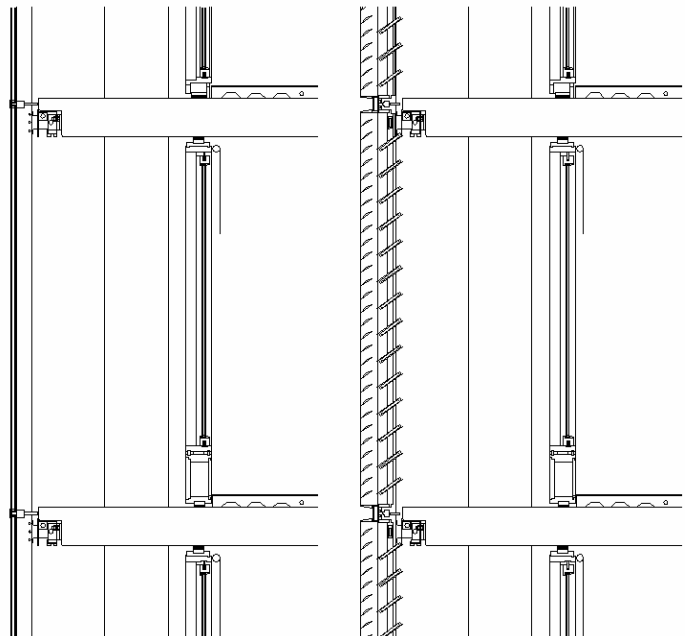


Abbildung 24: Fassadendetail und –innenansicht von Objekt 10

- Die Doppelfassade hat eine verschließbare Außenfassade. Der Fassadenzwischenraum, bzw. der Korridor, hat eine Breite von 1m und keine horizontale Abtrennung.
- Das Konzept dieser Doppelfassade weist einen deutlichen Unterschied zu anderen Fassaden beim Öffnen der Außenfassade auf. Während bei Zu- und Abluftöffnungen bei anderen doppelschaligen Fassaden eine achsenweise Lösung gefunden wurde, geht es hier um eine geschossweise Lösung. Jede Seite des quadratischen Grundrisses hat zwei geschosshohe Öffnungen mit einer verschließbaren Glaslamellenkonstruktion, die von der Zentrale

entsprechend den Witterungsverhältnissen steuerbar ist. Im Winter wird die Lüftung durch die zeitweise offene Außenfassade erfolgen. In der Übergangs- und Sommerzeit wird die Außenfassade ganz geöffnet. Die öffnbare Größe der Außenfassade beträgt ca. 0 bis 11% bezogen auf die gesamte Fassadenfläche. Diese Konstruktion bietet einen k-Wert von $1,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ in geschlossenem Zustand.

- Der Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum kann motorisch von der Zentrale gesteuert werden. Durch die Breite des Zwischenraumes von 1 m bestehen überhaupt keine Durchströmungsprobleme hinter dem Sonnenschutz. Textilrollos befinden sich zusätzlich im Innenraum. Dies ist eine nur bei diesem Projekt verwirklichte Blendschutzmaßnahme gegen die Sonne im Winter.
- Zur Gebäudenachtkühlung wird die Betondecke, in der Heiz- und Kühlrohre verlegt sind, im Sommer zusätzlich in der Nacht mit Wasser gekühlt. Die Lüftungsanlage, deren Kanal in den unteren Bereich der Innenfassade integriert ist, wird beim Öffnen des Fensters automatisch abgeschaltet.

6.2.5 Typ 5 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade

Objekt 11 [56]

Das 12-geschossige Gebäude mit BGF 18400 m^2 wurde im April 2001 fertiggestellt. Es ist ein transparentes würfelförmiges Bürohaus mit einer Kantenlänge von 40 m. In der Mitte des Gebäudes befindet sich ein gebäudehohes Atrium, das als Erschließungsraum dient.

- Die Doppelfassade hat eine regulierbare Hinterlüftung. Konstruktiv hat sie äußere raumhohe Ganzglasdrehflügel, die im Winter geschlossen und sonst gelegentlich offen bleiben. Die öffnbaren Innenfenster haben zwei unterschiedliche Größen. (siehe Abbildung 25.)
- Der Abstand zwischen Innen- und Außenfassade beträgt 250 mm. Die Außenfassade besteht aus 12 bzw. 15 mm Einfachsicherheitsverglasung, und wird von der Zentrale automatisch gesteuert. Die Außenfassade bleibt im Winter geschlossen oder wird gelegentlich für die Fensterlüftung geöffnet. Die öffnbare Größe der Außenfassade beträgt ca. 1,5 bis 45,8% bezogen auf die gesamte Fassadenfläche. Weil die Außenfassade in der Übergangszeit und dem Sommer je nach Wettersituationen stufenlos maximal bis $32,1^\circ$ nach außen geöffnet werden kann, besteht keine Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum. Es besteht jedoch eine vertikale Rezirkulationsgefahr bei der ganz geöffneten Außenfassadeneinstellung.

6 Untersuchung von Beispielen

- Durch Fensterkontakte wird das Außenfenster beim Öffnen eines der zwei Innenfenster automatisch geöffnet. Bei Regen und Wind von maximal mehr als 8 m/s werden die Außenfenster automatisch geschlossen. Infolge dieser Gebäudeautomation ist eine optimale Gebäudenachtkühlung möglich.
- Im Fassadenzwischenraum befinden sich 50 mm breite horizontale Lamellenstors als Sonnenschutz. Weil die Außenfassade ganz geöffnet werden kann, spielt hier eine Durchströmung hinter dem Sonnenschutz nur eine geringe Rolle.

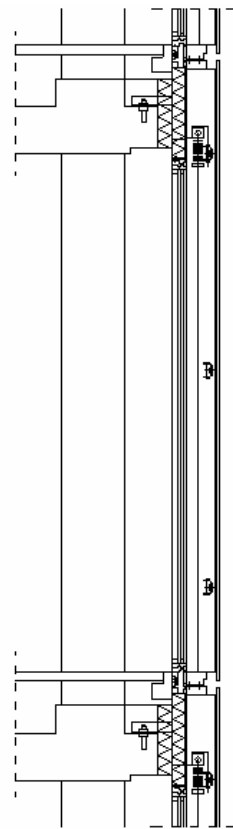


Abbildung 25: Fassadendetail und –außenansicht von Objekt 11

6.2.6 Typ 6 – Sonderformen, wie mehrgeschossige Doppelfassade mit Schachteffekt

Objekt 12 [57], [58]

Das Gebäude mit 22 Geschossen wurde im Jahr 1999 fertiggestellt. Die BGF von der neu erweiterten Fläche beträgt 19000 m² und hat einen sichelförmigen Grundriss mit 7-10 m Breite und eine Hauptorientierung nach West und Ost.

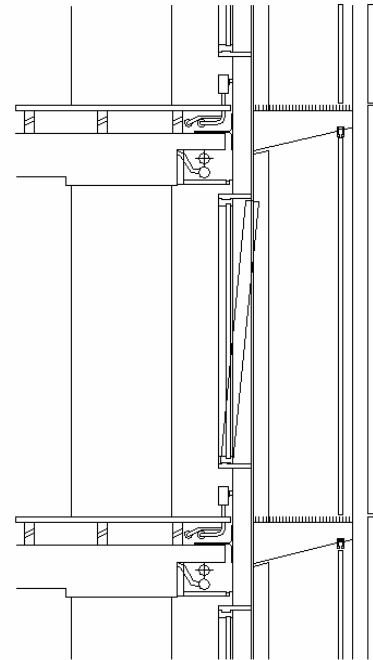


Abbildung 26: Westfassadendetail und –innenansicht von Objekt 12

- Zwei unterschiedliche Doppelfassadensysteme sind hier je nach der Orientierung eingesetzt. Die Westfassade hat eine doppelschalige Pfosten-Riegel-Konstruktion, die eine durchlaufende Kaminwirkung über die gesamte Höhe erlaubt. Die Ostfassade ist eine doppelschalige, vorgehängte Elementfassade, die eine Belüftung nicht ermöglicht.
- Bei der Westfassade beträgt der Abstand zwischen Außen- und Innenfassade 90cm. Die Außenfassade hat eine Einfachverglasung und die Innenfassade ein motorisch gesteuertes Dreh-Kippfenster mit einem Isolierglas und einem k-Wert von $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Im Fassadenfuß des obersten Geschosses und Fassadenkopf des untersten Geschosses des gesamten Fassadenzwischenraumes befinden sich die Zu- und Abluftöffnungen, die einen großen thermischen Auftrieb infolge der großen Höhe erlaubt. Sie werden mit der Gebäudeleittechnik motorisch reguliert. Die Höhe zwischen dieser Zu- und Abluftöffnung beträgt etw. 20 Geschosse.
- Der in der Fassade integrierte und im Fassadenzwischenraum liegende Sonnenschutz ist aus perforierten vertikal drehbaren Leichtmetallprofilen. Er wird motorisch gesteuert und ist individuell von den Nutzern oder automatisch von der Zentrale einstellbar. Aufgrund der Konstruktion ist eine Durchströmung hinter dem Sonnenschutz unproblematisch.

6 Untersuchung von Beispielen

- Bei der Ostfassade ist eine Lamellenkonstruktion von außen zu sehen. Die dahinterliegenden Öffnungen ermöglichen eine Zu- und Abluftfunktion. Ursprünglich wurde hier ein Querlüftungskonzept von Ost nach West entwickelt, so dass die Ostfassade ausschließlich eine Zuluftfunktion und die Westfassade eine Abluftfunktion besitzt.

Objekt 13 [35], [59]

Das im Jahr 2001 fertiggestellte Gebäude ist 135 m hoch und hat 32 Geschosse. Die BGF beträgt 45543 m².

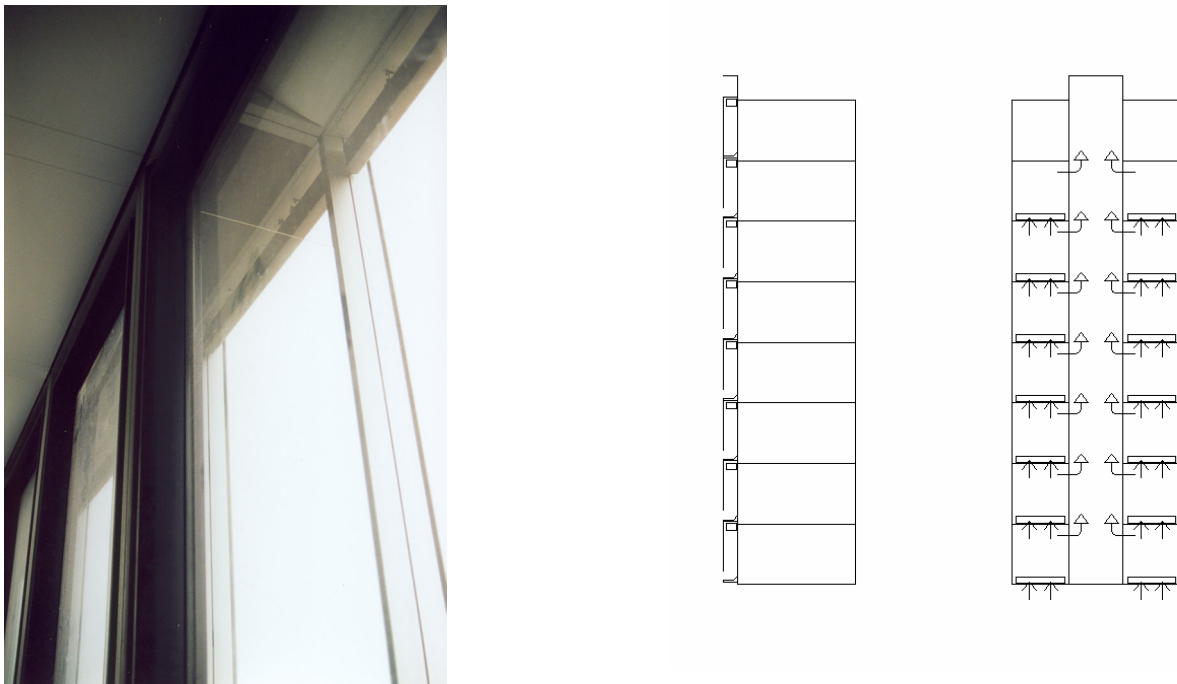


Abbildung 27: Ansicht der Überströmungsöffnung und Strömungskonzept in der Fassade von Objekt 13

- Diese Doppelfassade hat ein Schachtkonzept mit regulierbarer Hinterlüftung im Fassadenzwischenraum. Drei Fassadenachsen sind eine thermisch getrennte Einheit, und jedes dritte Fassadenmodul in der Mitte ist als Glaskamin ausgebildet. Die Zuluft strömt über Öffnungsschlitze in Fußbodenhöhe zu den anderen beiden Fassadenachsen nach. Der durch die Stapelung von jeweils acht Geschossen herbeigeführte Kamineffekt saugt die Abluft in Höhe der Deckenkonstruktion an. In jeder achten Geschossebene befinden sich Abluftöffnungen. Die Überströmungshöhen verändern sich geschossweise. (siehe Tabelle 7) Je höher das Geschoss liegt, desto größer wird die Überströmungshöhe.

6 Untersuchung von Beispielen

- Der Abstand zwischen Außen- und Innenfassade beträgt 72,5 cm. Die Außenfassade aus Einfachsicherheitsglas bildet eine Aluminium-Pfosten-Riegel-Konstruktion. Die Innenfassade ist ein Wende­flügelfenster mit Eichenholz-Fenster-Elementen. Der k-Wert beträgt 1,5 W/m²K. Der Wende­flügel kann nur vom Benutzer manuell geöffnet werden. Beim Öffnen der Fenster werden die Kühldecke und die mechanische Belüftung automatisch abgeschaltet. Die Gebäudenachtkühlung funktioniert gut, da die Konstruktion bei geöffneter Innenfassade gegenüber Wettereinflüssen unempfindlich ist.
- Im Fassadenzwischenraum befindet sich 9 % perforierte Aluminiumlamellen direkt vor der Innenverglasung als Sonnenschutz.

Etage	1	2	3	4	5	6	7	8
Höhe der Zulüftung (mm) Breite ca. 1400 (mm)	200	200	200	200	200	200	200	-
Höhe der Überströmöffnung (mm) Breite ca. 550 (mm)	125	125	150	250	400	550	650	-
Höhe der Abluftöffnung (mm) Breite ca. 1400 (mm)	-	-	-	-	-	-	-	1150

Tabelle 7: Höhe der Zulüftung, Überströmung und Ablüftung, Quelle [55]

6.3 Beurteilung der projektbezogen untersuchten Fassadentypen

6.3.1 Typ 1 – Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitz an der Außenfassade

Bis Mitte der 90er Jahre wurden viele Projekten mit diesem Konzept gebaut. Derzeitig gebaute Beispiele mit diesem Konzept sind selten. Die Gründe hierfür liegen in sowohl winterlichen als auch sommerlichen Nachteilen aufgrund der nichtregulierbaren Hinterlüftung. Die Größe der Zu- und Abluftöffnungen spielen hier eine wichtige Rolle.

Bei kleinen Öffnungen ist der Vorteil des winterlichen Lüftungseffekts groß. Er erfolgt jedoch nur bei geöffneter Innenfassade. Bei geschlossener Innenfassade ist eine passive Nutzung ausgeschlossen, da die erwärmte Luft wieder unmittelbar nach außen abströmt. Fensterlüftung ist weder an sonnigen warmen Tagen in der Übergangsjahreszeit noch im Sommer infolge der Überhitzung möglich. Größere Ab- und Zuluftöffnungen oder eine Strömungsoptimierung der Gestaltung könnten dieses Problem vermeiden. Dies jedoch führt wiederum im Winter zu Nachteilen, weil der Volumenstrom im Winter im Fassadenzwischenraum steigt.

In diesem Zusammenhang bedeutet die Ausführung von diesem Doppelfassadentyp immer eine einseitige Lösung, die entweder den Sommer oder den Winter abgestimmt wird. Bessere Beispiele hierfür sind Objekt 1 und 2. Die Doppelfassade ist strömungstechnisch optimiert. Durch diese Form wird ein hoher Volumenstrom im Fassadenzwischenraum erreicht. An sommerlichen oder sonnigen Tagen können sie wahrscheinlich problemlos funktionieren. Probleme treten dagegen im Winter auf. Infolge der strömungstechnischen Gestaltungsoptimierung und dem größeren Temperaturunterschied zwischen innen und außen ist eine Vergrößerung des Volumenstromes unvermeidbar. Dadurch bleibt der Temperaturunterschied zwischen außen und Fassadenzwischenraum vernachlässigbar. Dies bedeutet, dass sich die Einsatzdauer für eine Fensterlüftung im Winter ebenfalls reduziert.

Die Objekte 4 und 5 sind abgeänderte Beispiele der Doppelfassade von Typ 1. Es wurde versucht, die Rezirkulation der Abluft anders zu lösen. Meistens hat eine typische Doppelfassade eine Zulüftung unten und einer Ablüftung oben. Hier handelt es sich um eine seitliche Zulüftung. Beim Beispiel 5 ist eine engere Fensterbreite gegenüber Projekt 4 eingebaut, um die Überhitzungsgefahr infolge des dadurch verstärkten Volumenstromes zu minimieren. Trotzdem ist der Anteil 3,5% der Zuluftschnitte bezogen auf die gesamte Fassadenfläche zu gering. Der Hauptvorteil bei den Objekten 4 und 5 liegt in der niedrigeren Lärmübertragungsgefahr sowohl von außen als auch aus Nebenräumen. Problematisch bleibt immer noch die nicht regulierbare Hinterlüftung im Fassadenzwischenraum.

Beim Objekt 3 ist die Innenfassade in 2 Fenster vertikal unterteilt. Das ermöglicht eine mengenvariable Luftzufuhr. Diese Variante ist besonders im Winter vorteilhaft, weil die Zuluft besser kontrolliert werden kann. Dies macht aber im Sommer wenig Sinn. Zum Schluss muss erwähnt werden, dass die Doppelfassade von Typ 1 für Fensterlüftung überhaupt nur bedingt geeignet ist.

6.3.2 Typ 2 – Doppelfassade mit z. T. regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade

Durch die zusätzlichen Klappen- oder Steuerungsmechanismen in den Zu- und Ablüftungsschnitten kann der Volumenstrom im Fassadenzwischenraum reguliert werden. Dadurch kann der Wärmebedarf gegenüber dem Typ 1 reduziert werden. Ein Beispiel hierfür ist Objekt 6. Seine vertikal bewegliche Außenfassade wird im Winter nach oben gezogen. Wenn die Innenfassade gekippt wird, ereignet sich eine Mischung der vorerwärmten Luft mit der Abluft vom Raum in der Fassadenmitte. Diese gemischte Luft steigt weiter und kommt wieder in den Raum als Zuluft herein. Ein Verlust dieser passiv vorerwärmten Luft wie beim Typ 1 konnte hier vermieden

werden. Trotz dieser im Winter positiv wirkenden Mechanismen ist das sommerliche Verhalten damit nicht wesentlich verbessert.

6.3.3 Typ 3 – Doppelfassade mit z. T. regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffentlicher Außenfassade

Bei diesem Typ wurden die Nachteile der Typen 1 und 2 an sonnigen Tagen verbessert. In der sonnigen Übergangs- und Sommerzeit kann die Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum mit dieser Maßnahme deutlich verringert werden. Bei Objekt 7 z. B. kann die sommerliche Wirkung als sehr gut bewertet werden. Das Gebäude öffnet seine äußere Haut bis 86% zu der gesamten Fassadenfläche und hat daher im Sommer eigentlich eine einschalige Fassade mit außen liegendem Sonnenschutz. Weil die direkte Transmissionsrate durch die äußere Verglasung geringer ausfällt und keine Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum besteht, kann der Einfluss von sekundärer Wärmeabgabe nach innen reduziert werden. Im Sommer kann daher sogar theoretisch eine bessere Wirkung als bei einer einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz erwartet werden. Die Auswirkung von Typ 2 und 3 im Winter ist ausreichend, weil der Fassadenzwischenraum eine Hinterlüftung je nach den Öffnungsgrößen permanent erlaubt.

6.3.4 Typ 4 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffentlicher Außenfassade

Infolge der ganz abschließbaren Außenfassade kann hauptsächlich der Transmissionswärmeverlust bei Nutzerabwesenheit und geschlossener Fassade gegenüber Typen 1, 2 und 3 nochmals verbessert werden. Während im Winter die Wärmeschutzeigenschaft von diesem Typ überzeugend ist, besteht die Schwierigkeit der Fensterlüftung bei einer sonnigen Übergangsjahres- und Sommerzeit, wenn der Fassadenzwischenraum eine ausreichende Hinterlüftung nicht erlauben kann. Objekt 8 und 9 sind die Beispiele hierfür.

Objekt 10 weist ein ähnliches Problem auf. Die winterliche Wirkung ist gut, weil die Außenfassade sogar dicht geschlossen werden kann. Die sommerliche Funktion ist dagegen wieder kritisch, weil ein ausreichender Volumenstrom im Fassadenzwischenraum auf diese Weise nicht erreicht werden kann.

6.3.5 Typ 5 – Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffentlicher Außenfassade

Hier werden die Nachteile von Typen 1, 2, 3 im Winter und von Typ 1, 2, 4 im Sommer weiter verringert. Dieser Typ weist nach Meinung des Verfassers die am besten funktionierenden typologischen Eigenschaften auf. Im Winter funktioniert die Fassade so wie bei Typ 4 beschrieben und im Sommer so wie bei Typ 3. Ein Beispiel mit dieser Maßnahme ist Objekt 11. Sowohl im Winter als auch im Sommer hat diese Doppelfassade die geringsten Probleme, die sonst bei klassischen Doppelfassaden auftauchen können.

6.3.6 Typ 6 – Sonderformen, wie mehrgeschossige Doppelfassade mit Schachteffekt

Die beiden Objekte 12 (die Westfassade) und 13 haben eine ähnliche Bauform der Doppelfassade, wobei Schachtkonstruktionen über mehreren Geschosse integriert sind. Trotz der zahlreichen Messungen und Simulationen mit positivem Ergebnis sind solche Doppelfassade problematisch.

Zu den typischen Problemen dieser Doppelfassaden gehören folgende zwei Aspekte: Erstens gibt es eine vertikale Rezirkulation der Abluft vom unteren Stockwerk zum oberen Stockwerk. Der Grund dafür liegt im thermischen Auftrieb und der Druckverteilung am Gebäude. *(siehe Bild 5 rechts.)* In den oberen Stockwerken strömt die Abluft von den unteren Stockwerken ein. Daher kann bei diesen Fassaden eine Übertragung von Geruch und Schmutz sehr viel problematischer ausfallen als zunächst erwartet. Dies ist bei Objekt 12 der Fall.

Der zweite Aspekt ist die erhebliche Überhitzungsgefahr im Fassadenzwischenraum. Besonders im oberen Stockwerk ist eine erhebliche Temperaturerhöhung an sonnigen Tagen häufig nicht vermeidbar. Eine Fensterlüftung im oberen Stockwerk ist daher sowohl im Sommer als auch in der Übergangsjahreszeit nicht denkbar. Zusätzlich kann der konvektive Wärmestrom nach innen infolge der Temperaturerhöhung der Oberfläche durch die langwellige Wärmestrahlung verstärkt werden. Um die Durchlüftung zu verstärken, wurden hier unterschiedliche Maßnahmen durchgeführt. Bei Objekt 12 wurde eine Flügelkonstruktion verwendet, die zusätzlich einen Unterdruck erzeugt. Diese wurde direkt oberhalb der Abluftöffnung auf dem Dach eingebaut. Dadurch wird die Durchströmung bei Wind beschleunigt. Bei Objekt 13 ist die Größe der Überströmungsöffnung zwischen seitlichen Zuluftkanälen und mittlerem Ablüftungskanal bei höheren Stockwerken immer größer. Dieser Maßnahme kann die Durchströmung beschleunigen. Eine problemlose Funktion der beiden Fassaden bleibt aber skeptisch zu bewerten.

Aufgrund dieser zwei Zusammenhänge muss die Doppelfassade streifenweise in Zu- und Abluftkanäle aufgeteilt werden [60].

6.3.7 Fazit

Bei der Besichtigung der Gebäude war bemerkenswert, dass die Fensterlüftung von den Nutzern abhängig ist. Alle untersuchten Projekte haben zusätzlich raumlufttechnische Anlagen, die dem heutigen Standard entsprechen. Diese technische Ausrüstung ist gegenüber reiner freier Fensterlüftung besser, da sie regulierbar ist und ein konstanter Luftwechsel eingestellt werden kann. Daher kommt es häufig vor, dass die Nutzer häufig keine Fensterlüftung einsetzen, sondern die technische Anlage konstant laufen lassen, obwohl die Außenbedingungen bereits für Fensterlüftung akzeptabel sind.

6.4 Zusammenfassung

Hauptsächlich wurden in diesem Kapitel die verschiedenen Variationen von Doppelfassaden aus der Praxis untersucht. Mit einer neu definierten Klassifikation wird die Funktion der jeweiligen Doppelfassaden von „schlecht“ bis „sehr gut“ beurteilt. Das Ergebnis zeigt eine differenziertere Wertung gegenüber einer reinen Ablehnung von Doppelfassaden aufgrund ihrer thermischen und strömungstechnischen Eigenschaften.

Die geschossweise getrennten Doppelfassaden thermisch zu beurteilen, fällt relativ leicht. Dagegen zeigt es sich, dass bei den mehrgeschossigen Doppelfassaden vorab eine Beurteilung schwerer ist. Es bestehen insbesondere Risiken bei diesen Doppelfassadenkonstruktionen, die nach der Fertigstellung nicht mehr ohne gravierende konstruktive Veränderungen behoben werden können. (*siehe Kapitel 6-3-6*)

7 Dynamische Gebäudesimulation mit „Trnsys“

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine Simulation mit dem Programm „Trnsys“ unter thermischen und energetischen Aspekten durchgeführt. Es gibt bereits Untersuchungen, bei denen die thermischen Effekte von einschaligen Fassaden mit unterschiedlichen Verglasungen simuliert worden sind [61]. Die Doppelfassade wurde ebenfalls bereits mehrmals hinsichtlich ihres thermischen Verhaltens simuliert. In diesem Kapitel werden jedoch insbesondere die thermischen Lasten zwischen einschaligen und doppelschaligen Fassaden verglichen.

In 7-2 werden die Randbedingungen detailliert definiert. Dann werden die jährlichen Heiz- und Kühllasten nach jahreszeitlich unterschiedlichen Parametern simuliert. Weil die Randbedingungen jahreszeitlich verschieden ausfallen, ist diese Maßnahme notwendig. Im Folgenden wird die Fensterlüftungsmöglichkeit in Abhängigkeit von Temperaturverlauf im Fassadenzwischenraum berechnet. Es wird beobachtet, inwieweit eine Fensterlüftung in der gesamten Zeit (8760 h) und in der Arbeitszeit (2870 h) möglich ist. Da die thermischen Lasten von Büros mit unterschiedlicher Orientierung des Gebäudes deutliche Unterschiede im Jahres- und Tagesverlauf aufweisen, ist eine differenzierte Betrachtung von diesen Räumen erforderlich.

Im Folgenden wird nachgewiesen, dass Büros mit unterschiedlichen Fassaden auch einen unterschiedlichen Energiebedarf aufweisen und sich eine Fensterlüftung bei allen Räumen nicht identisch verhält, sondern aufgrund der unterschiedlichen Strahlungsintensität der Sonne je nach Orientierung sehr unterschiedlich ausfällt. Damit kann festgestellt werden, wie lange eine Fensterlüftung bei unterschiedlich konstruierten Fassaden möglich ist. Als Standort des zu simulierenden Gebäudes wird Seoul gewählt, da dort ein extremgemäßigtes Klima herrscht. Damit können die Vor- und Nachteile der Doppelfassaden vom Typ 1 bis 6 von Kapitel 6 verdeutlicht werden.

Die folgenden Abkürzungen werden verwendet :

- sf- : **S**ingle**f**assade (einschalige Fassade)
- i : mit **I**nnensonnenschutz
- a : mit **A**ußensonnenschutz
- i+a : mit **I**nnen- und **A**ußensonnenschutz
- df- : **D**oppelf**f**assade (doppelschalige Fassade)

- p : mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitzen an der Außenfassade, Typ 1
- r : mit z. T. regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffenbarer Außenfassade, Typ 2
- d : mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffenbarer Außenfassade, Typ 5

Der Grund für die Auswahl von Doppelfassaden vom Typ 1, 2 und 5 ist, dass sich die thermische Wirkung dieser drei Typen sehr deutlich unterscheidet, wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt. Während die Zulufttemperatur bei einschaligen Fassaden ungefähr die Außenlufttemperatur ist, wird bei doppelschaligen die mittlere Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum als Zulufttemperatur angenommen.

7.2 Bestimmung der Randbedingungen und Aufbau der Konstruktion

7.2.1 Physikalische Randbedingungen

Jahreszeitlich unterschiedlich erforderlichen Randbedingungen

Bei der Simulation eines Verwaltungsgebäudes, das jahreszeitlich unterschiedlichen Randbedingungen ausgesetzt ist, ist es kompliziert, alle Randbedingungen festzulegen. Zum Beispiel ist ausschließlich Heizbetrieb nur im Winter notwendig. In der Übergansjahreszeit können Heizung und Kühlung parallel schon innerhalb eines Tages zum Einsatz parallel kommen. Oder es wird nur Kühlung zum Einsatz kommen, wobei gleichzeitig eine zeitlich optimierte Gebäudenachtskühlung anzuwenden ist.

Aufgrund dieser komplexen Abläufe sind die Simulationen jahreszeitlich getrennt durchgeführt worden. Dadurch konnten Ergebnisse mit jahreszeitlich energetischer Optimierung erzielt werden. Sie sind in Excel weiter bearbeitet worden.

Die für alle Fassaden angenommen Randbedingungen

	Winter	Übergangszeit	Sommer
	Jan., Feb., März, Nov., Dez	April, Mai, Sep., Okt.	Juni, Juli, August
a. LW per Fenster	in der Arbeitszeit	in der Arbeitszeit	nach Input
Während Arbeitszeit	2fach	2fach	-
Außer Arbeitszeit	0,1fach (geschlossen)	0,1fach (geschlossen)	-
Bei Raumtemperatur $\geq 26\text{ °C}$	-	-	0,1fach (geschlossen)
Bei Raumtemperatur < 26 °C	-	-	2fach (für Gebäude- nachtskühlung)
b. LW per Ventilation	Ausgeschaltet	Ausgeschaltet	nach Input und in der Arbeitszeit
Bei Raumtemperatur $\geq 26\text{ °C}$	-	-	2fach
Bei Raumtemperatur < 26 °C	-	-	Ausgeschaltet
Von 18 bis 08 Uhr	-	-	Ausgeschaltet
c. Heizen	in der Arbeitszeit	in der Arbeitszeit	Ausgeschaltet
Während Arbeitszeit	min. 20 °C	min. 20 °C	-
Außer Arbeitszeit	min. 15 °C	min. 15 °C	-
d. Kühlen	Ausgeschaltet	in der Arbeitszeit	in der Arbeitszeit
Während Arbeitszeit	-	max. 26 °C	max. 26 °C
Außer Arbeitszeit	-	Ausgeschaltet	Ausgeschaltet
e. Wärmeübergangskoeffizient α in W/m ² K			
Außen : 23 W/m ² K			
Innen : 8 W/m ² K			
f. SonnenschutzEinstellung nach Strahlungsintensität der Sonne			
Sonnenschutz mit a = 40 % und r = 60 %			
Globalstrahlungsintensität	Einstellung		
$\leq 150\text{ W/m}^2$	Ausgeschaltet		
$150 < \text{ und } \leq 300\text{ W/m}^2$	Eingeschaltet, r nach Innen = 50 %, r nach Außen = 10 %		
$> 300\text{ W/m}^2$	Eingeschaltet, r nach Innen = 10 %, r nach Außen = 50 %		
g. Standort und Klimadaten für Simulation	Seoul – Standard Climate Data im Jahr 1998, von 0:00, 01.01.98 bis 24:00, 31.12.1998 mit Abstand von 1 Stunde (1 - 8760)		
h. Interne Kühllast	Person – 14 W/m ² , Computer – 20,16 W/m ² , Beleuchtung – 12,49 W/m ²		

i. Arbeitszeit	Montag bis Freitag – 08 bis 18 Uhr, Samstag – 08 bis 13 Uhr, Sonntag – keine Hier sind die koreanischen Feiertage nicht berücksichtigt worden.
----------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabelle 8: Allgemeine Randbedingungsbestimmung für die Simulation

Die für Doppelfassaden gültigen Randbedingungen

Bei Doppelfassaden (dfp, dfr, dfd)			
	Winter	Übergangszeit	Sommer
	Jan., Feb., März, Nov., Dez.	April, Mai, Sep., Okt.	Juni, Juli, August
a. LW per Fenster	in der Arbeitszeit	in der Arbeitszeit	nach Input
Während Arbeitszeit	2fach	2fach	-
Außer Arbeitszeit	0,1fach (geschlossen)	0,1fach (geschlossen)	-
Bei Raumtemperatur $\geq 26^{\circ}\text{C}$	-	-	0,1fach (geschlossen)
Bei Raumtemperatur $< 26^{\circ}\text{C}$	-	-	2fach (auch in der Nacht)
b. LW per Ventilation	Ausgeschaltet	Ausgeschaltet	nach Input und In der Arbeitszeit
Bei Raumtemperatur $\geq 26^{\circ}\text{C}$	-	-	2fach
Bei Raumtemperatur $< 26^{\circ}\text{C}$	-	-	Ausgeschaltet
Von 18 bis 08 Uhr	-	-	Ausgeschaltet
c. Heizen	in der Arbeitszeit	in der Arbeitszeit	Ausgeschaltet
Während Arbeitszeit	min. 20 °C	min. 20 °C	-
Außer Arbeitszeit	min. 15 °C	min. 15 °C	-
d. Kühlen	Ausgeschaltet	in der Arbeitszeit	in der Arbeitszeit
Während Arbeitszeit	-	max. 26 °C	max. 26 °C
Außer Arbeitszeit	-	Ausgeschaltet	Ausgeschaltet
e. Luftwechselrate im Fassadenzwischenraum			
DFP (Typ1)			
Tag	100	50	50
Nacht	100	50	50
DFR (Typ2)			
Tag	30	50	50
Nacht	30	50	50
DFD (Typ5)			
Tag	25	100	100
Nacht	10	50	100

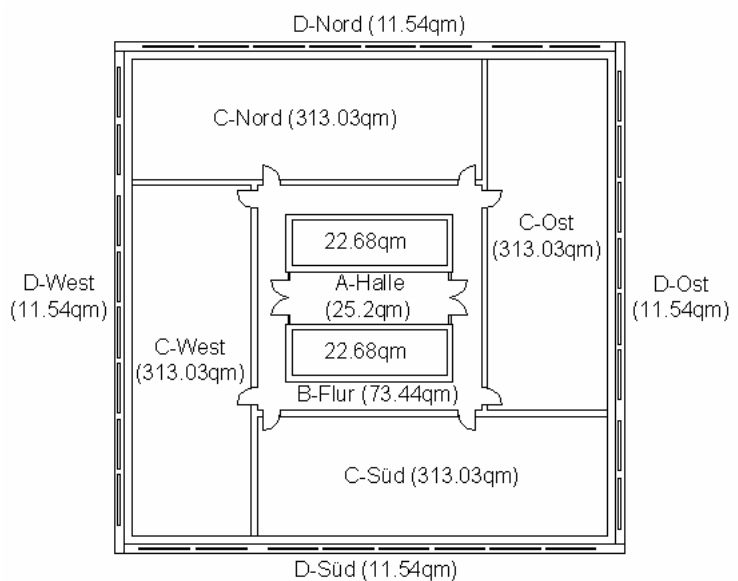
Tabelle 9: Randbedingungsbestimmung für Doppelfassade

Mit Hilfe der Forschungsarbeit von Claudia Ziller, RWTH-Aachen, kann der Luftwechsel bestimmt werden. Hier ist dieser für einen Vergleich der unterschiedlichen thermischen Wirkung von drei Doppelfassaden vereinfacht dargestellt.

Weil eine elektrisch angetriebene Kältemaschine zum Kühlen verwendet wird, wird im Rahmen dieser Arbeit der Energieaufwand zum „Heizen“ dem zum „Kühlen“ gleichgesetzt.

7.2.2 Aufbau der Konstruktion des Referenzgebäudes

Abbildung 28: Grundriss mit doppelschaliger Fassade. Der Aufbau des Grundrisses mit einschaliger Fassade erfolgt ohne D-Zone, wie D-Ost, D-West, W-Süd und S-Nord, die die Fassadenzwischenräume in doppelschaliger Fassade bedeuten.



Das Referenzgebäude, bei dem in der Mitte der Erschließungsbereich liegt, hat einen quadratischen Grundriss mit 25.4 m × 25.4 m. Da Großraumbüros am Standort Seoul, unter dessen Klimabedingungen die Simulationen durchgeführt werden, die Regel sind, werden sie hierbei betrachtet. Alle rechteckigen Büroräume haben eine identische Größe von 313,03 qm. Alle simulierten Fassaden werden hier als Ganzglasfassade angenommen. Zusätzlich wird ein Gebäude mit hoher Wärmespeicherkapazität angenommen, damit eine Gebäudenachtkühlung sinnvoll vorgenommen werden kann.

7.2.3 Auswahl der Verglasungstypen

Die einschaligen Fassaden haben eine 24mm dicke Wärmeschutzverglasung mit Kryptongasfüllung. Der k-Wert beträgt $1,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und der g-Wert 0,632. Doppelschalige Fassaden haben innen eine 24mm dicke Wärmeschutzverglasung mit Argongasfüllung und außen eine 4mm Einfachverglasung. Die innere Verglasung hat den k-Wert $1,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und g-Wert 0,589. Die äußere Verglasung hat dagegen den k-Wert $5,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und g-Wert 0,855.

7.3 Simulation mit ausschließlich mechanischer Lüftung

Es wurde eine Simulation mit ausschließlich mechanischer Belüftung mit Außenluft, ohne Berücksichtigung der Fensterlüftung, durchgeführt. Es wird gezeigt, inwieweit eine Doppelfassade (Typ 1) ohne offenes Fenster überhaupt Sinn gegenüber einer einschaligen Fassade macht. Alle Simulationen wurden ausschließlich mit mechanischer Belüftung durchgeführt. Die monatliche Differenz des Heiz- und Kühlbedarfs zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden wird hierdurch nachgewiesen.

Unter der mechanischen Belüftung ist die sommerliche Wirkung von Doppelfassaden (Typ 1) besser als bei allen einschaligen Fassaden. Die geringere Transmissionsrate und permanente Durchströmung im Fassadenzwischenraum machen dies möglich.

Der Heizbedarf der Doppelfassade Typ 1 ohne offenes Fenster liegt höher als der einer einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz und niedriger als der einer einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz. Das bedeutet, dass sich das Verhalten von Doppelfassaden mit permanenter Hinterlüftung und offenen Fenstern in der Realität kritischer auswirken kann als das einer einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz, wenn die Nutzer das Fenster im Winter nicht öffnen.

Insgesamt ist der ganzjährige Heiz- und Kühlbedarf der Doppelfassade vom Typ 1 in diesem Fall deutlich niedriger als der der einschaligen Fassade mit Innen- oder Außensonnenschutz, und höher als der der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz und Innenblendschutz.

7 Dynamische Gebäudesimulation mit „Trnsys“

Tabelle 10: Vergleich des monatlichen Heizbedarfes mit 2fachem mechanischem Luftwechsel

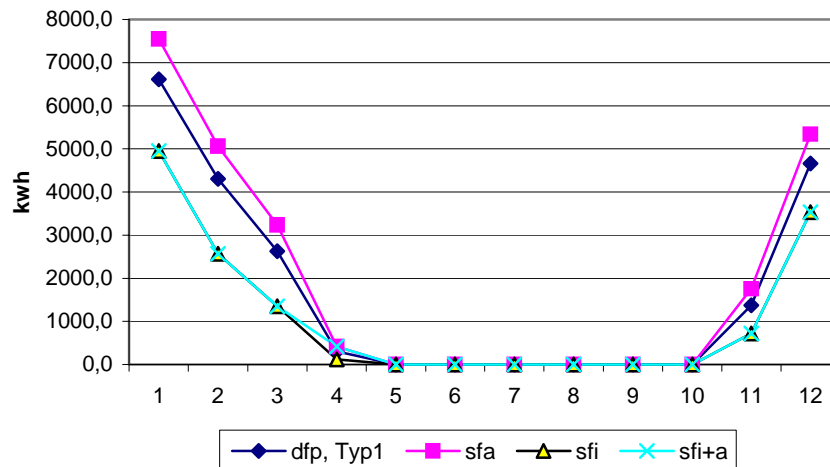


Tabelle 11: Vergleich des monatlichen Kühlbedarfes mit 2fachem mechanischem Luftwechsel

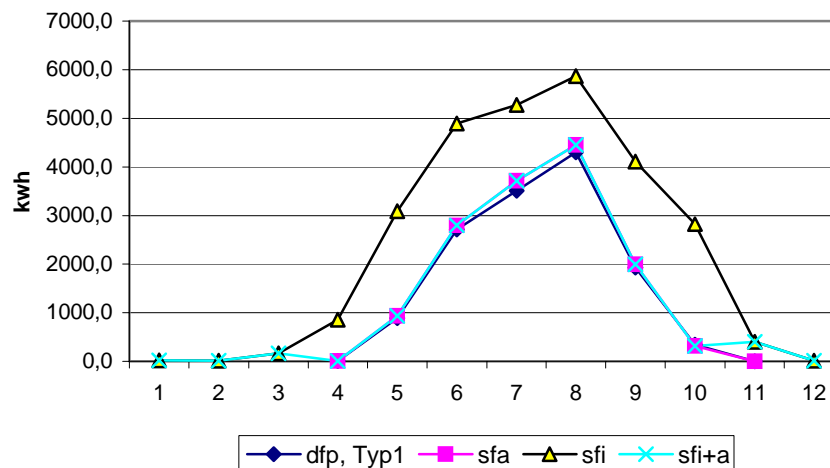
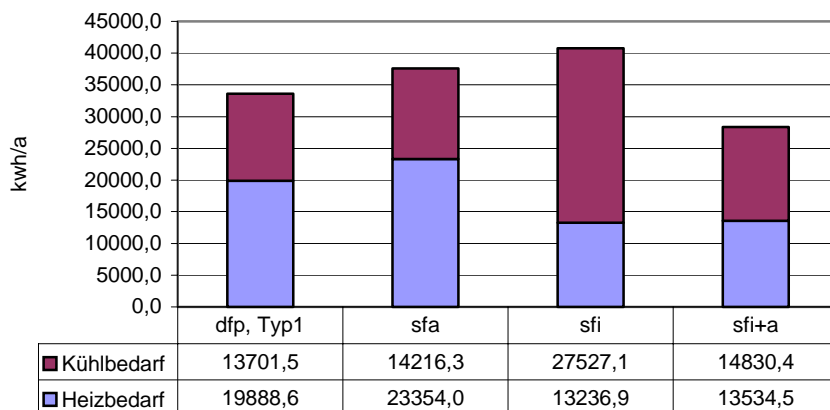


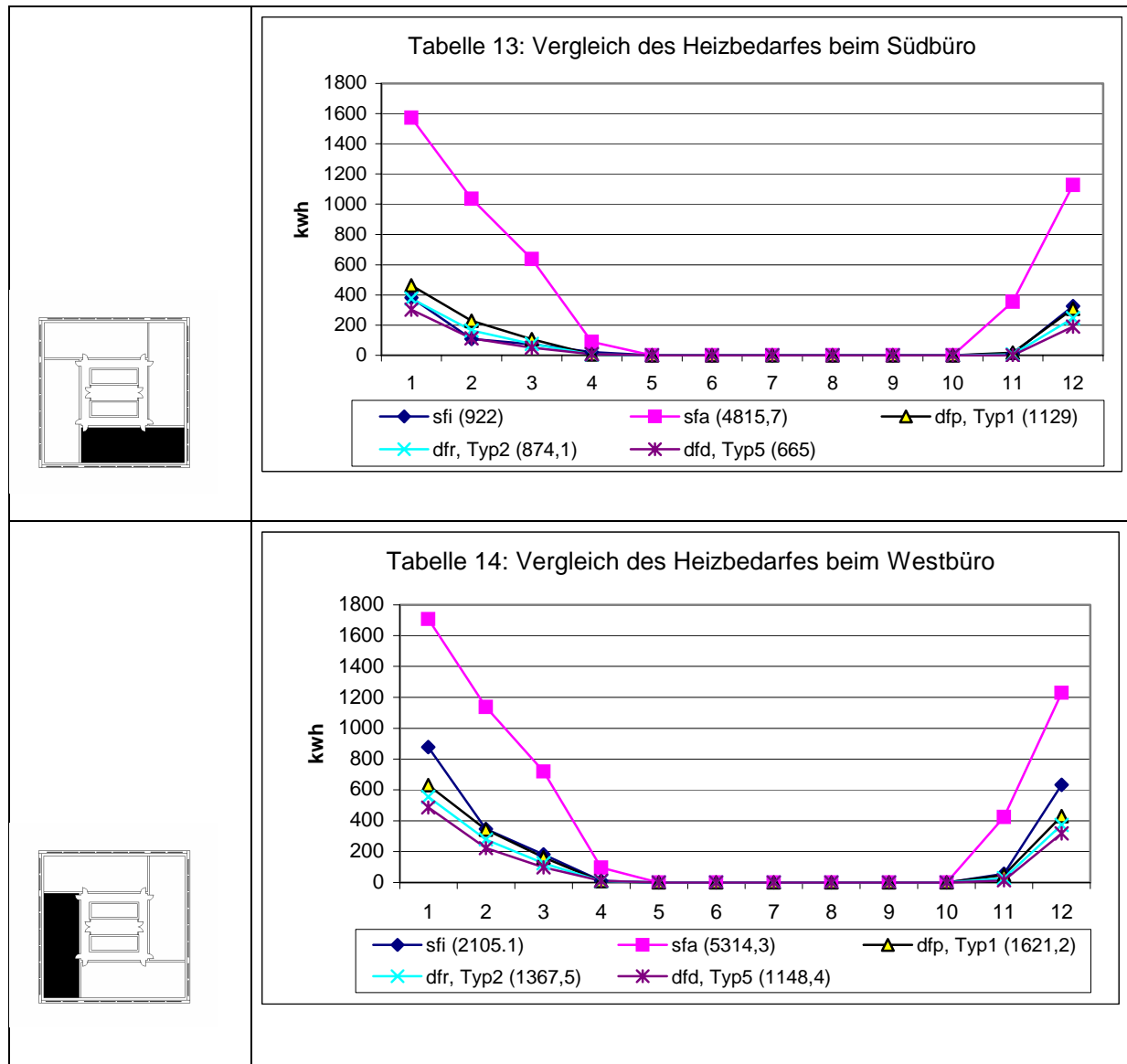
Tabelle 12: Heiz- und Kühlbedarfsvergleich mit 2fachem mechanischem Luftwechsel



7.4 Simulation unter der Berücksichtigung von Fensterlüftung

7.4.1 Vergleich des Heiz- und Kühlbedarfes

Vergleich des monatlichen Heizbedarfes



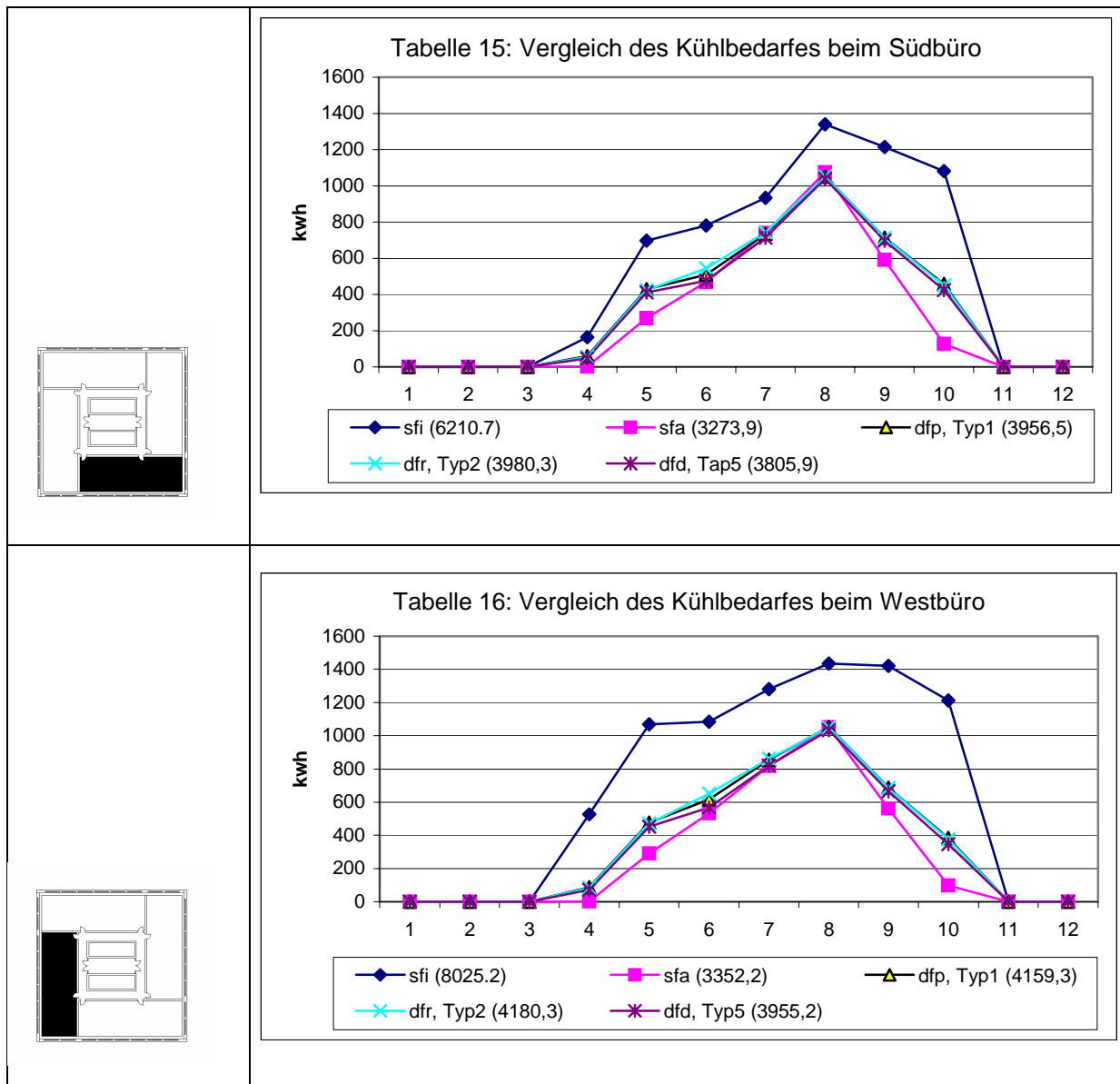
Der Heizbedarf bei Westbüros (313m^2) zeigt, dass sich die doppelschaligen Fassaden vorteilhaft gegenüber einschaligen Fassaden verhalten. Die einschalige Fassade mit Innensonnenschutz folgt mit kleinem Abstand. Trotz eines verstellbaren Sonnenschutzes benötigt die Fassade mit außenliegendem Sonnenschutz den größten Energiebedarf.

$$\text{dfd, Typ5} > \text{dfr, Typ2} > \text{dfp, Typ1} > \text{sfi} (\approx \text{sfi} + \text{a}) \gg \text{sfa}$$

Bei Südbüros (313m²) sieht es etwas anders aus. Ganzjährig betrachtet hat die Fassade mit Innensonnenschutz einen besseren Wert (922 kWh) als die Doppelfassade vom Typ1 (1129 kWh).

dfd, Typ5 > dfr, Typ2 > sfi (≈sfi+a) > dfp, Typ1 >> sfa

Vergleich des monatlichen Kühlbedarfes



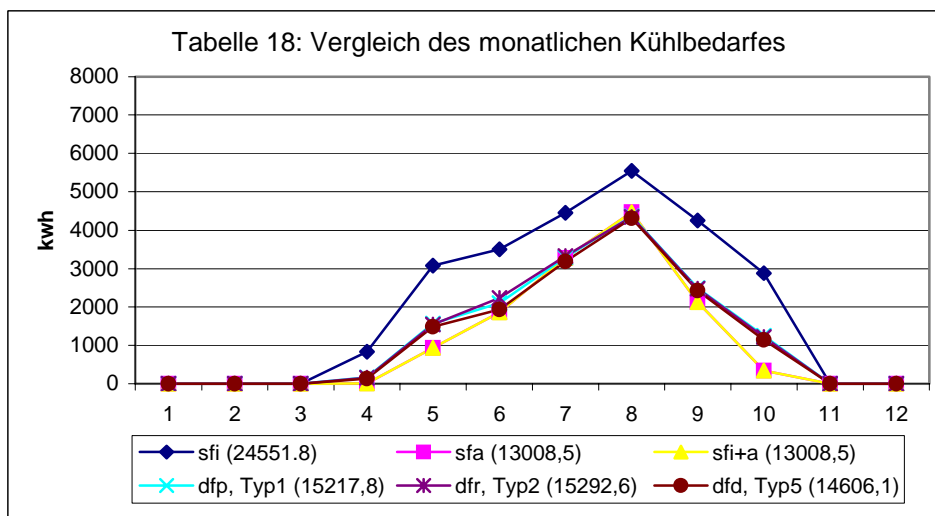
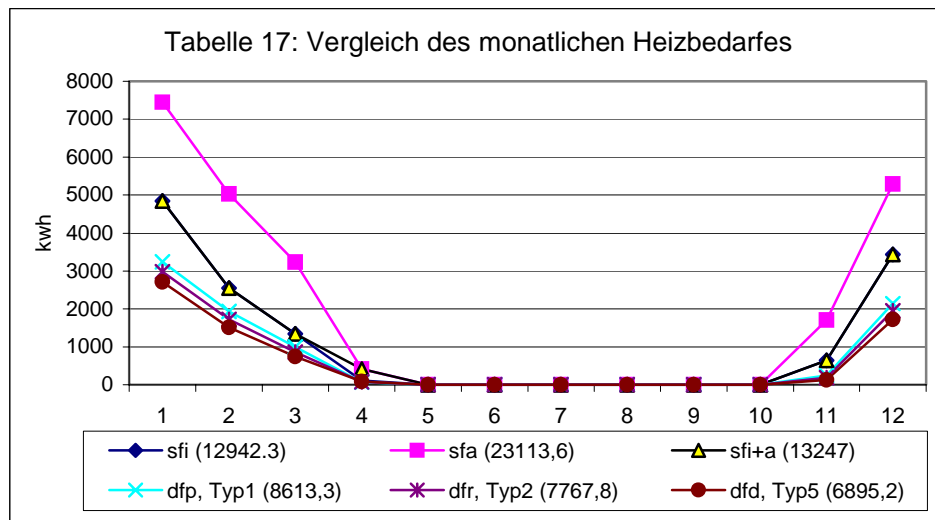
Beim Kühlbedarfsvergleich von Westbüros (313m²) besitzt die Fassade mit Außensonnenschutz den besten Wert (3352,2 kWh). Den schlechtesten Wert hat die Fassade mit Innensonnenschutz, dessen Wert deutlich höher als der aller anderen liegt.

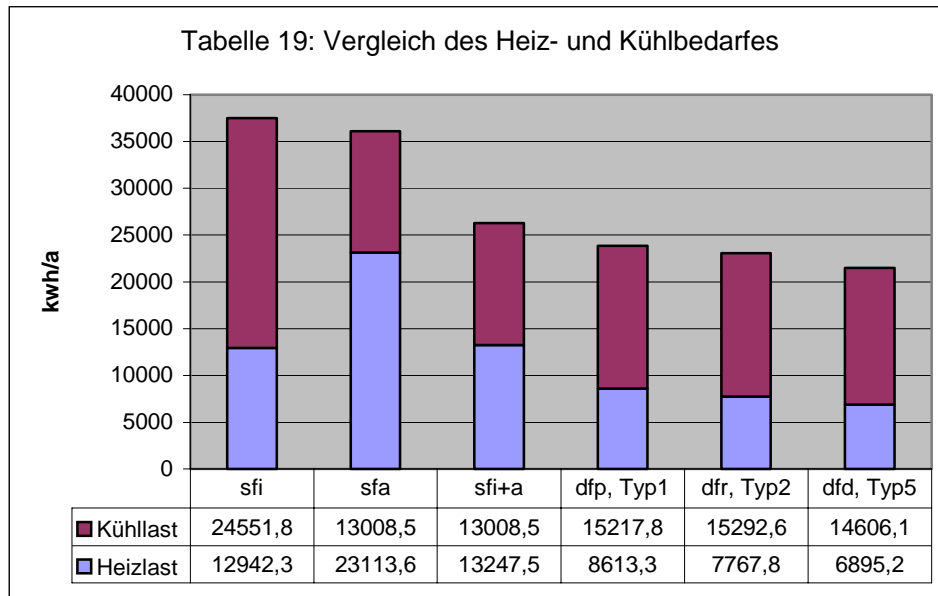
$$sfa (\approx sfi+a) > dfd, \text{Typ5} > dfr, \text{Typ2} > dfp, \text{Typ1} \gg sfi$$

Gegenüber Westbüros (313m²) liegen die Werte von Südbüros etwas niedriger. Während der Kühlbedarf der Fassade mit Innensonnenschutz beim Westbüro 8025,2 kWh beträgt, liegt es beim Südbüro bei 6210,7 kWh.

$$sfa (\approx sfi+a) > dfd, \text{Typ5} > dfr, \text{Typ2} > dfp, \text{Typ1} \gg sfi$$

Vergleich des monatlichen Heiz- und Kühlbedarfes





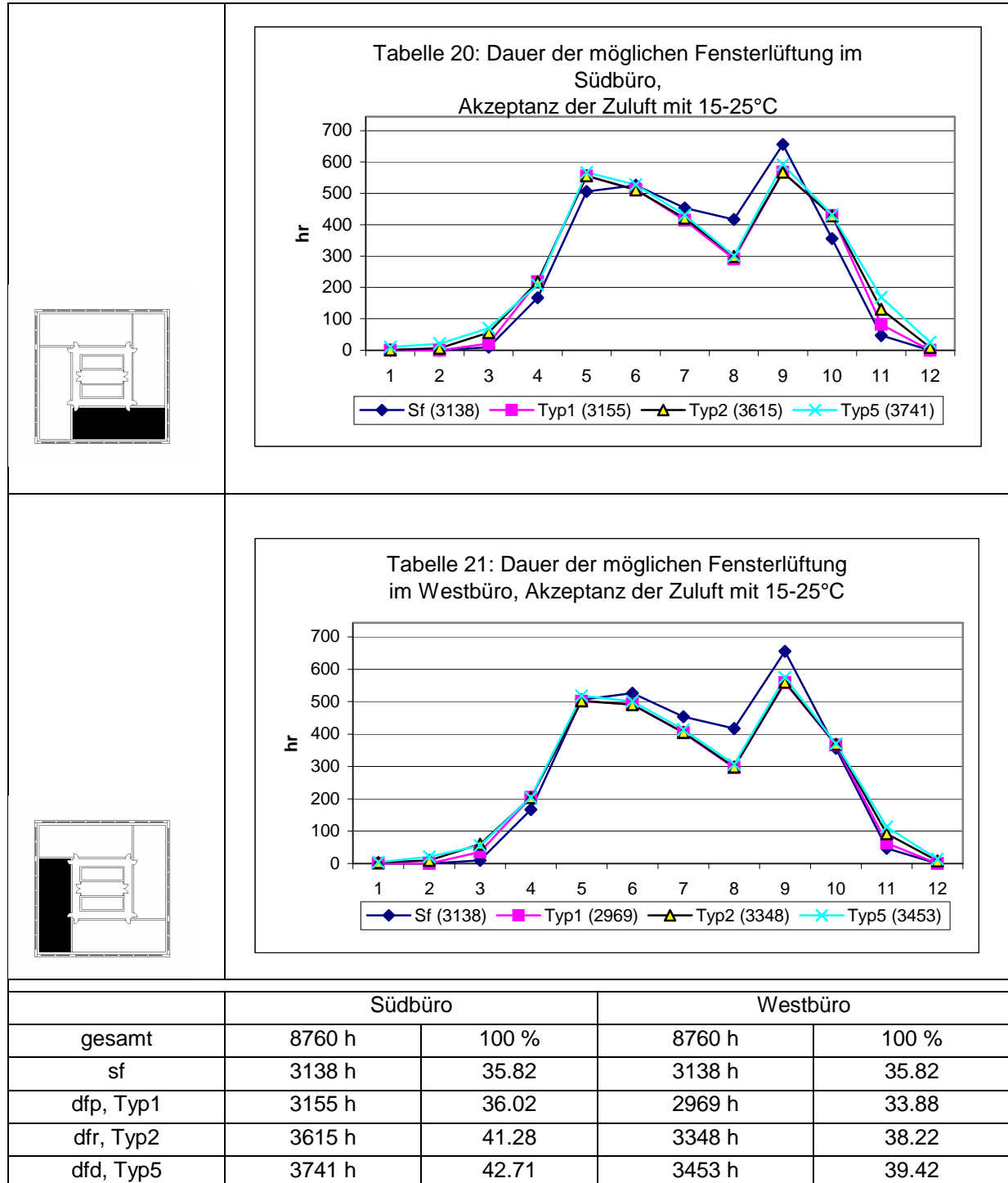
Der monatliche gesamte Heizbedarf ist bei der Doppelfassade vom Typ 5 (6895,2 kWh) am günstigsten. Bei der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz ist der monatliche gesamte Kühlbedarf am geringsten. Während die einschalige Fassade mit Innensonnenschutz den schlechtesten Wert aufweist, hat ganzjährig betrachtet die Doppelfassade vom Typ 5 das beste Ergebnis. Dies folgt aus dem erheblich geringeren Heizbedarf dieser Fassade gegenüber der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz, die trotz des geringsten Kühlbedarfes einen hohen Heizbedarf besitzt. Daher kann ausschließlich die einschalige Fassade mit Außensonnenschutz und Innenblendschutz positiv bewertet werden. Insgesamt kann festgestellt werden, daß ein deutlicher Unterschied zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden beim ganzjährigen Vergleich besteht. Das im Winter vorteilhafte Lüftungskonzept der Doppelfassade, das eine einschalige Fassade nicht besitzt, ist energetisch sehr günstig. Zum Beispiel hat sie nur 30 % Heizbedarf gegenüber der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz.

$$\text{dfd, Typ5} > \text{dfr, Typ2} > \text{dfp, Typ1} > \text{sfi+a} \gg \text{sfa} > \text{sfi}$$

7.4.2 Dauer der möglichen Fensterlüftung bei West- und Südbüro

Dauer der möglichen Fensterlüftung, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C

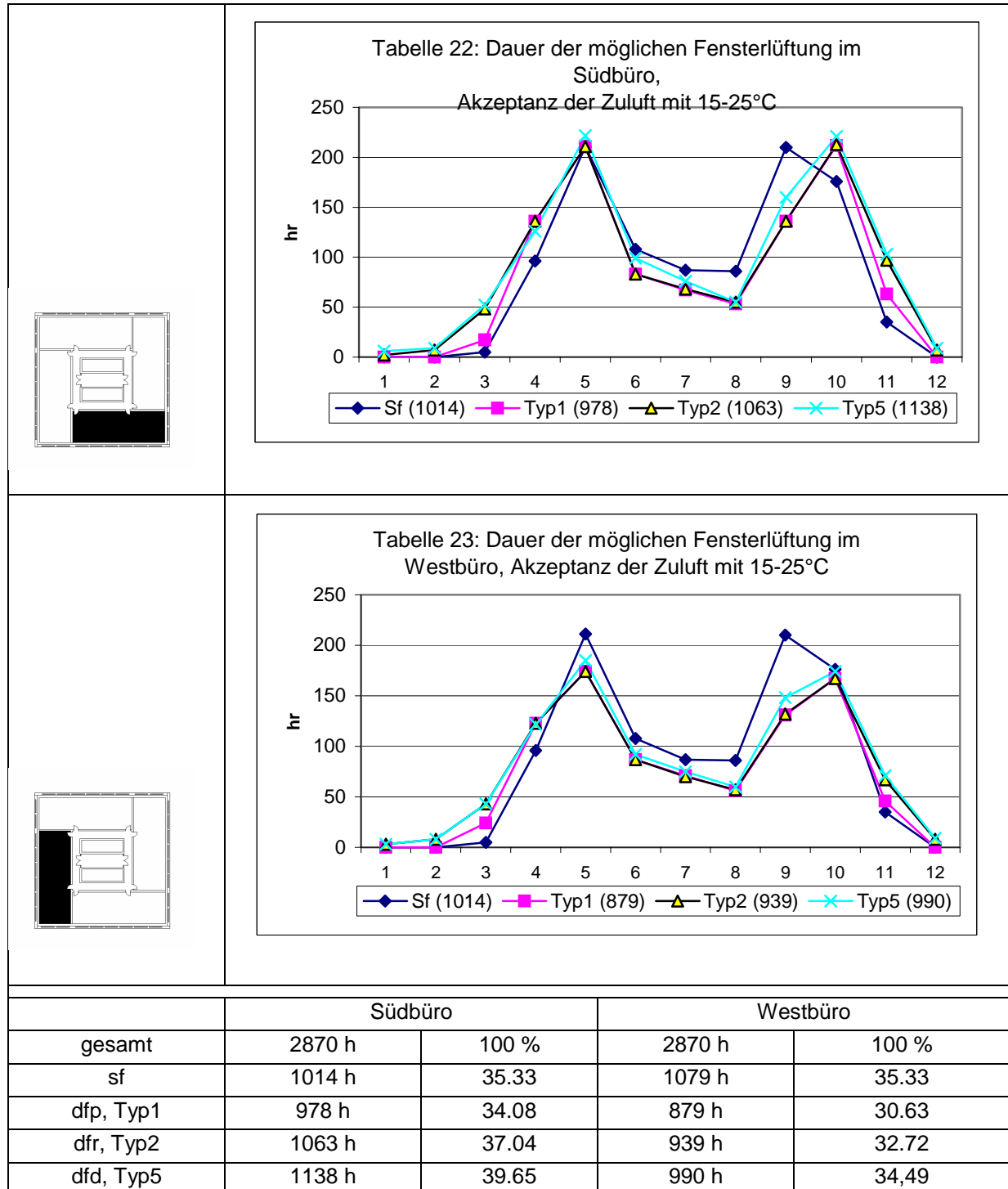
in gesamter Zeit (8760 h)



Wenn als Zulufttemperatur 15 bis 25 °C in der gesamten Zeit erlaubt ist, dann liegt beim Südbüro mit der Doppelfassade vom Typ 3 und 5 ein um 5 % besseres Ergebnis gegenüber der einschaligen Fassade vor. Insgesamt ist der Unterschied

zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden nicht groß. Diesen geringen Unterschied zeigen die Tabellenverläufe. Der winterliche Vorteil der Doppelfassade ist gegenüber der einschaligen Fassade nicht besonders groß. Beim Westbüro ist der Unterschied noch geringer. Das Ergebnis der Doppelfassade vom Typ 1 ist schlechter als das von der einschaligen.

Während der Arbeitszeit (2870 h)

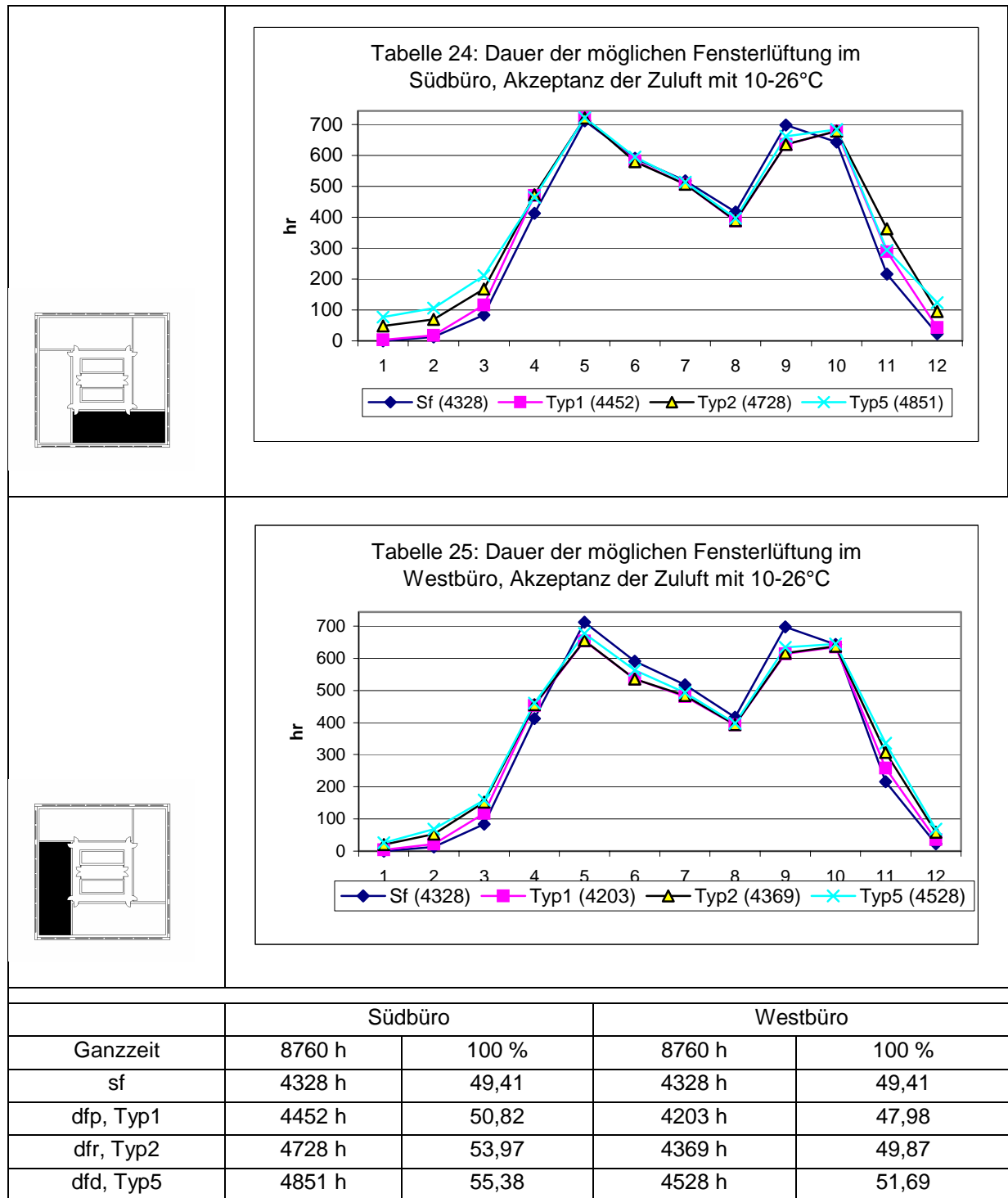


Bei Südbüros während der Arbeitszeit unterscheiden sich die Ergebnisse insgesamt geringer. Der Grund liegt darin, dass der winterliche Vorteil der Doppelfassade im

Sommer ausgeglichen wird. Das Ergebnis der einschaligen Fassade fällt im Sommer besser aus. Die Doppelfassade vom Typ 1 schneidet beim Südbüro schlechter ab als die einschalige Fassade. Bei Westbüros ist sogar die Einsatzdauer der Fensterlüftung bei einschaligen Fassaden länger möglich als bei allen doppelschaligen.

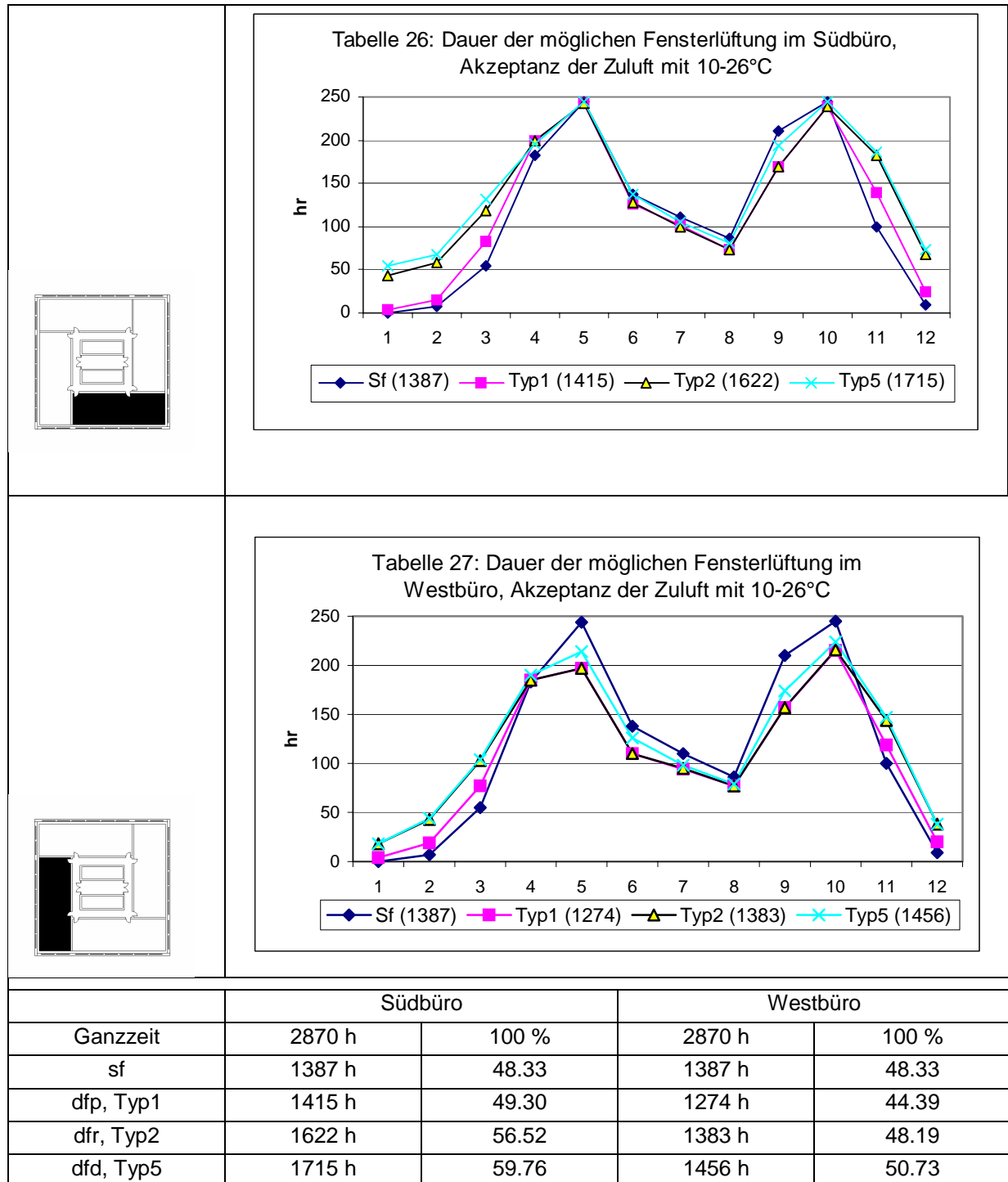
Dauer der möglichen Fensterlüftung, Akzeptanz der Zuluft mit 10-26°C

In gesamter Zeit (8760 h)



Wenn die Toleranz der Zulufttemperatur von 15 – 25 °C auf 10 – 26 °C in der ganzen Zeit angehoben wird, so verlängert sich die mögliche Einsatzdauer der Fensterlüftung sowohl bei doppelschaligen als auch bei einschaligen Fassaden. Das heißt, dass es auch hier keine großen Unterschiede geben wird. Beim Westbüro sind die Ergebnisse ebenfalls sehr ähnlich.

Während der Arbeitszeit (2870 h)

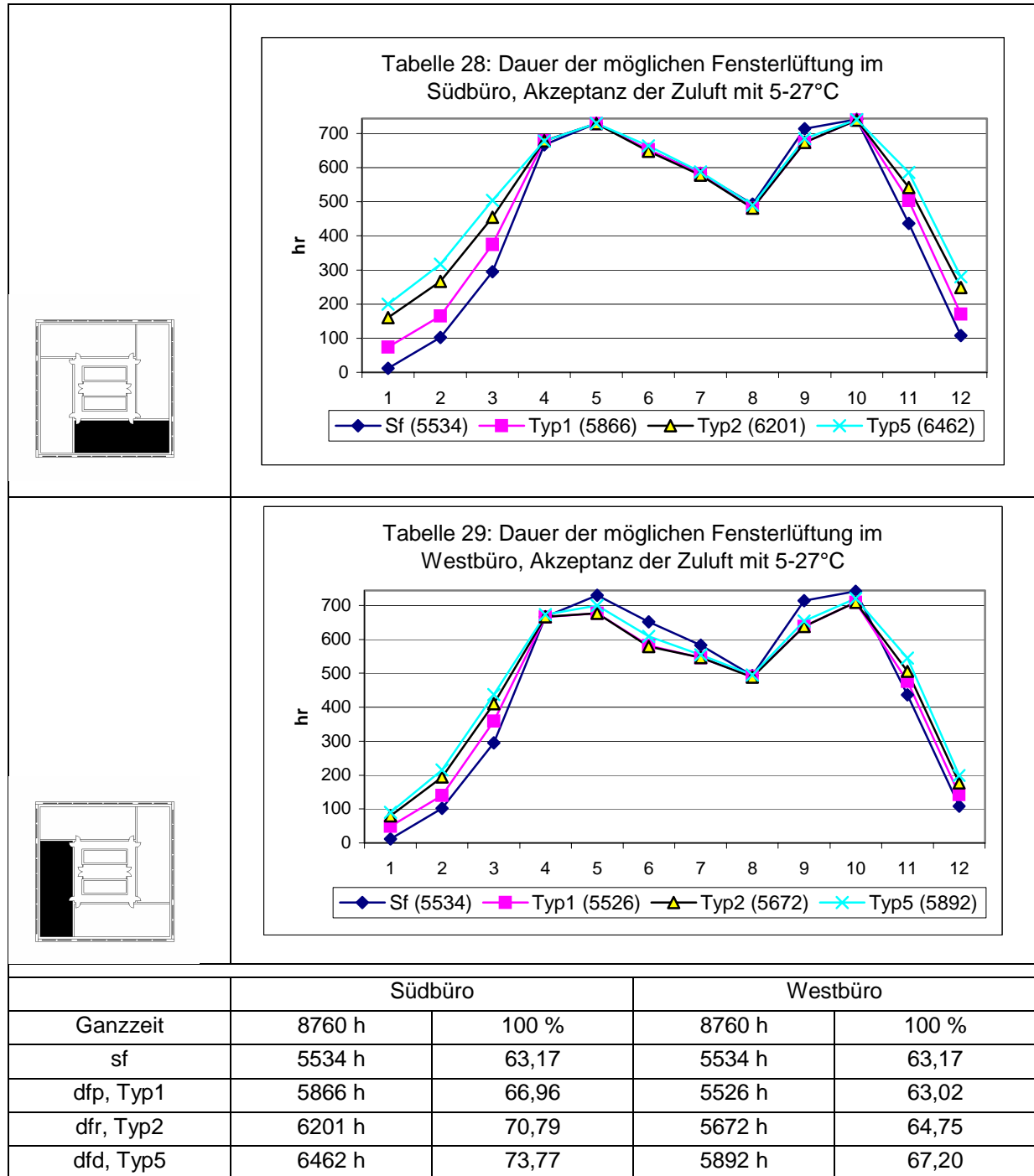


Während der Arbeitszeit wird der Unterschied zwischen einschaligen und doppelschaligen Fassaden deutlich. Es betrifft aber nur noch das Südbüro. Jedoch

ist der Unterschied zwischen der Doppelfassade vom Typ 1 und der einschaligen Fassade beim Südbüro geringfügig. Zwischen der Doppelfassade vom Typ 5 und der einschaligen Fassade ist der Unterschied am größten. Er liegt bei mehr als 10 %. Beim Westbüro ist die Wirkung der einschaligen Fassade besser als bei Typ 1 und 2, etwas schlechter als bei Typ 5.

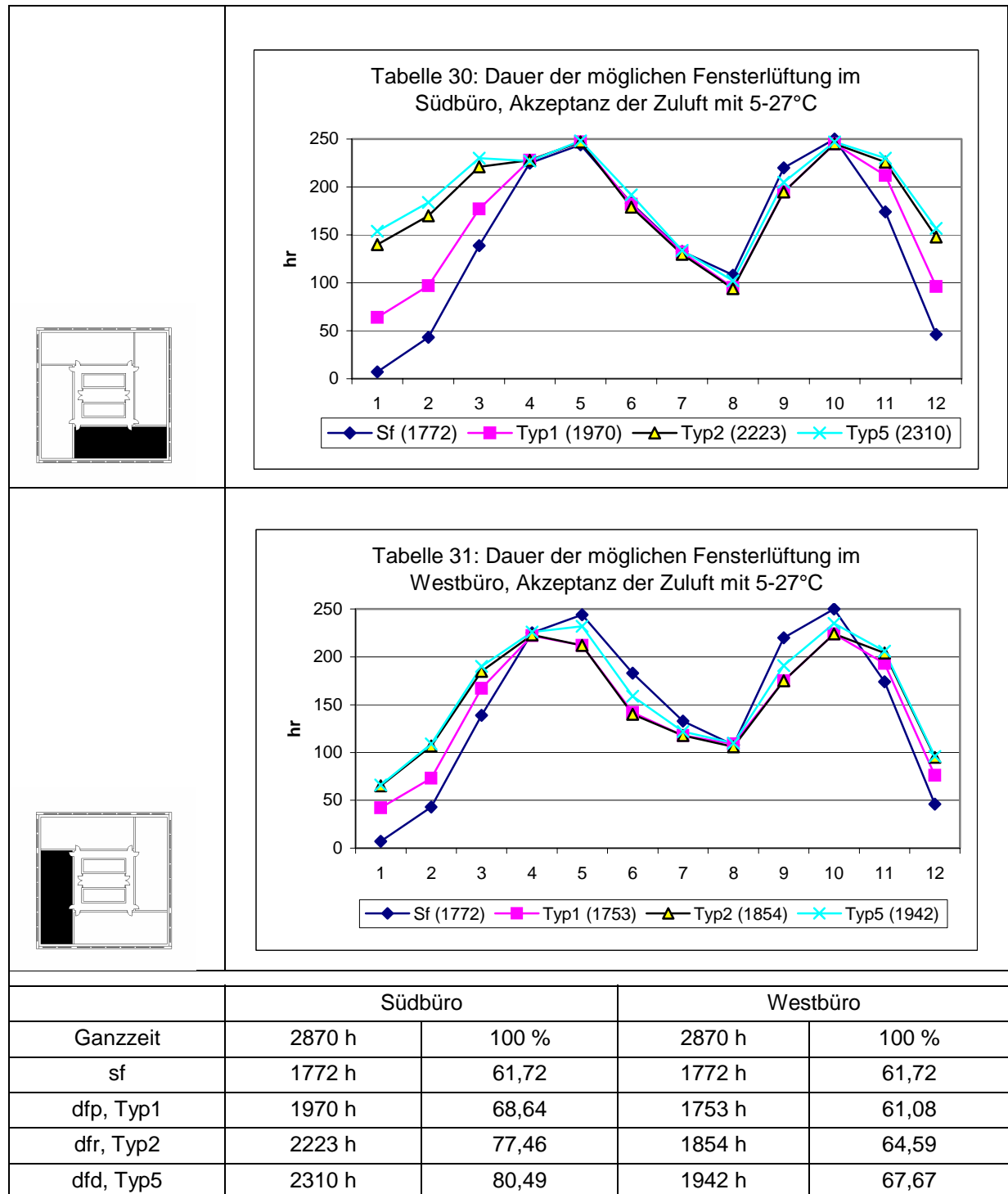
Dauer der möglichen Fensterlüftung, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C

in gesamter Zeit (8760 h)



In diesem Fall hat sich die Einsatzdauer von Fensterlüftung erneut vergrößert. Die niedrigste erlaubte Zulufttemperatur beträgt 5 °C und die höchste 27 °C. Der Vergleich der Ergebnisse während der ganzen Zeit zeigt, dass sich die Einsatzdauer von Doppelfassaden infolge der winterlichen Vorteile vergrößert. Im Südbüro ist der Vorteil besonders deutlich. Im Westbüro ist der Unterschied aber weiterhin infolge der Verkürzung der Lüftungsdauer während des Sommers gering.

Während der Arbeitszeit (2870h)



Dieser Vergleich zeigt den größten Unterschied zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden. Die Doppelfassade kann fast 20% länger für eine Fensterlüftung als eine einschalige eingesetzt werden. Dies resultiert hauptsächlich aus den winterlichen Vorteilen. Für die Auswirkung auf das Westbüro zeigt Typ 1 immer noch keinen wesentlichen Unterschied. Die Doppelfassade vom Typ 5 kann aber für das Westbüro relativ positiv bewertet werden.

7.5 Ergebnisdiskussion

7.5.1 Raumlufthtemperaturverlauf im Sommer und Zulufttemperaturverlauf im Winter beim Südbüro

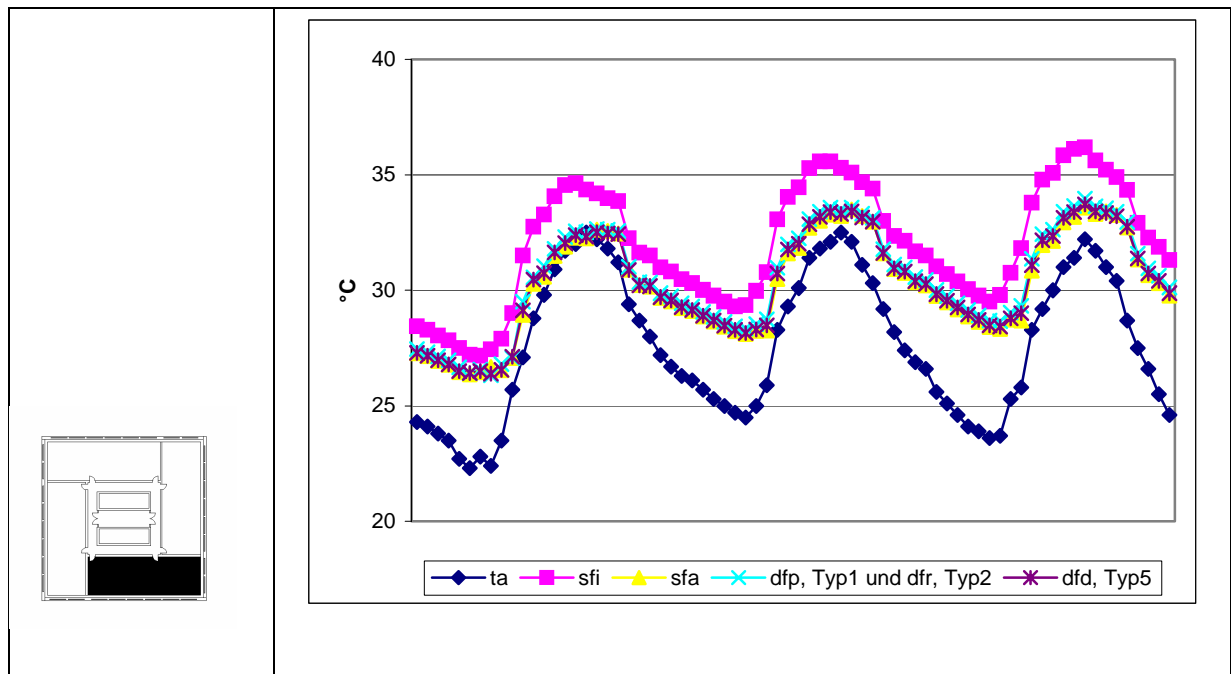


Tabelle 32: Vergleich des Raumlufthtemperaturverlaufes im Sommer bei Südbüros von 0:00 Uhr am 13. bis 24:00 Uhr am 15. August 1999 (die höchste globale Strahlungsintensität am ersten Tag = 823 W/m^2 , am zweiten Tag = 664 W/m^2 und am dritten Tag = 840 W/m^2), Die Ergebnisse der anderen Büros sind im Anhang B.

Es ist nochmals notwendig, den Heiz- und Kühlbedarf, der in der Simulation ermittelt werden konnte, zu validieren. Für den Sommerfall sind die Raumlufthtemperaturen von unterschiedlich konstruierten Fassaden ohne Kühlung berechnet worden. Für den Winterfall wird die Temperatur im Fassadenzwischenraum der drei Fassadentypen mit Außenlufttemperatur verglichen, die bei der einschaligen Fassade ungefähr die Zulufttemperatur ist. Für den sehr warmen Sommer wird das Ergebnis von 0:00 Uhr am 13. August bis 24:00 Uhr am 15. August 1999 verglichen.

Für den kalten Winter liegt das Ergebnis von 0:00 Uhr am 15. Januar bis 24:00 Uhr am 17. Januar 1999 vor. An diesem Versuch kann beobachtet werden, wie die Raumlufttemperatur gegenüber der Behaglichkeitszone im Sommer steigt und ob die Zulufttemperatur im Winter angemessen ist.

Die Simulation wird ohne Kühlung durchgeführt. Da die Fensterlüftung bei der Zulufttemperatur über 26°C unsinnig ist, bleiben die Fenster hier während der gesamten Arbeitszeit geschlossen. Bei 2fachem Luftwechsel hat die einschalige Fassade mit Innensonnenschutz, die die höchste Strahlungsquote nach innen zulässt, den höchsten Temperaturverlauf. Der Unterschied der höchsten Temperatur zwischen dieser und den anderen Fassaden liegt durchschnittlich bei ca. 3 – 5 K. Trotz des Einsatzes einer Gebäudenachtkühlung durch die Speichermasse liegt der Temperaturverlauf in der Nacht bei der einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz höher als bei den anderen Fassaden. Bei geschlossenem Fenster zeigen die Doppelfassaden einen niedrigen Temperaturverlauf. Trotzdem ist der niedrigste Temperaturverlauf bei der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz festzustellen.

$$sfa (\approx sfi+a) > dfd, Typ5 > dfp, Typ1 \text{ und } dfr, Typ2 >> sfi$$

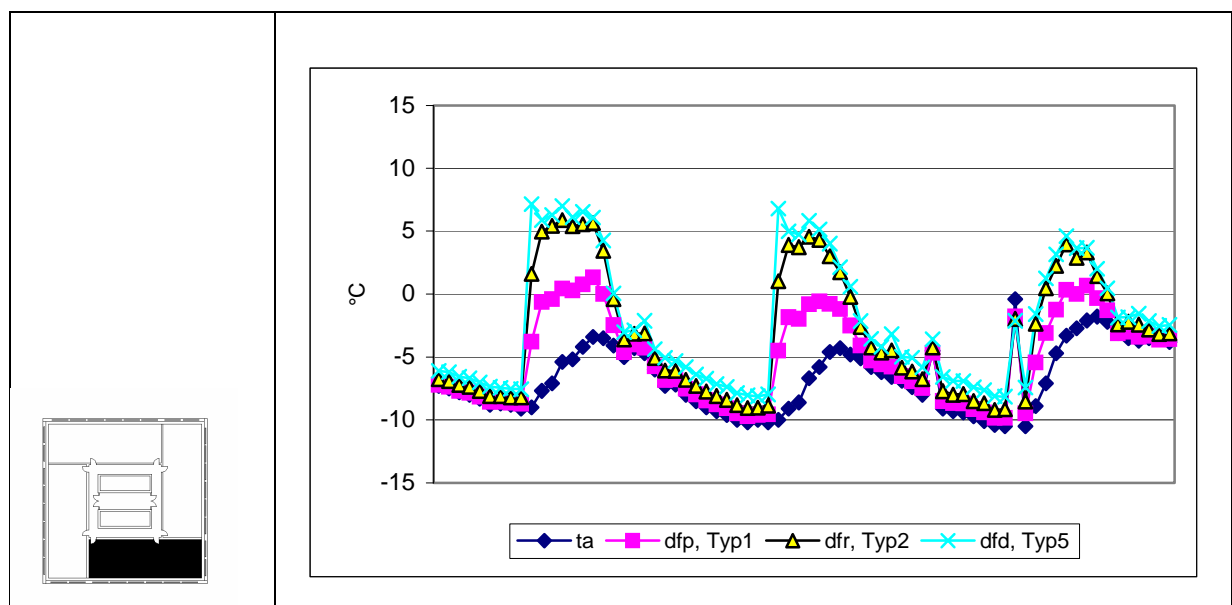


Tabelle 33: Vergleich des Zulufttemperaturverlaufes im Winter bei Südbüros von 0:00 Uhr am 15. bis 24:00 Uhr am 17. Januar 1999 (die höchste globale Strahlungsintensität am ersten Tag = 824 W/m², am zweiten Tag = 788 W/m² und am dritten Tag = 503 W/m²), Die Ergebnisse der anderen Büros sind im Anhang C.

Während die Außenlufttemperatur, die bei einschaligen Fassaden näherungsweise die Zuluft ist, deutlich unter 0°C liegt, sieht die Temperatur bei verschiedenen

Doppelfassaden anders aus. In der Winternacht ist die Temperatur im Fassadenzwischenraum vom Typ 5 ebenfalls sehr gering, dabei weist sie einen Temperaturunterschied gegenüber der Außenlufttemperatur von nur 1.5 – 2.5 K auf. Am Wintertag ändert sich das Ergebnis deutlich. Dieser Temperaturunterschied zwischen Außenlufttemperatur und der Fassadenzwischenraumtemperatur bei Typ 5 liegt bei 5 – 10 K. Zwischen den einzelnen Doppelfassaden unterscheiden sich die Ergebnisse ebenfalls drastisch. Typ 2 und 5 haben einen deutlichen Vorsprung von Typ 1. Ein geringer Unterschied besteht jedoch zwischen Typ 2 und 5.

$$dfd, Typ5 > dfr, Typ2 \gg dfp, Typ1 \gg t_a$$

7.5.2 Verlängerung der Fensterlüftung bei doppelschaligen Fassaden gegenüber einschaligen Fassaden

Die Simulationen nur für den Heiz- und Kühlbedarf wurden unter der Annahme durchgeführt, dass die Nutzer für den Winterfall während ihrer gesamten Arbeitszeit nur über Fenster unabhängig von der niedrigen Zulufttemperatur lüften. Bei dieser Annahme stimmt die Betrachtung des Heiz- und Kühlbedarfes zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden überein. Dies ist jedoch in der Realität nicht immer der Fall. Infolge der Zugerscheinung bei niedriger Zulufttemperatur sollte besser nicht über das Fenster sondern über die mechanische Raumlüftung gelüftet werden. Je länger die Fenster offen bleiben, desto größer wird die Differenz zwischen einschaligen und doppelschaligen Fassaden. Aus diesem Grund ist der zweite Teil 7-4-2 „Dauer der möglichen Fensterlüftung“ ein sinnvoller Ansatz. Es konnte darin festgehalten werden, inwieweit der Einsatz der Fensterlüftung je nach verschiedener Akzeptanz der Zulufttemperatur und der Orientierung variieren kann. Durch die Simulation konnten folgende wichtige Hinweise festgestellt werden:

Typ 1 ist insgesamt unabhängig von der Orientierung nachteilig, auch wenn eine große Akzeptanz der Zuluft gewährleistet wird. Besonders beim Westbüro war das Ergebnis häufig schlechter als bei einschaligen Fassaden. Daher kann dieser Typ 1 nur sehr bedingt eingesetzt werden. Wenn eine Doppelfassade ihre Vorzüge im Winter weiter ausbauen soll, dann ist der Typ 2 hierfür besser geeignet. Der sommerliche Nachteil bleibt aber wie bei Typ 1 bestehen. Typ 5 ist die beste Variante der Doppelfassade. Sie ist überall einsetzbar. Der winterliche Vorteil kann weiter maximiert werden. Das sommerliche Verhalten wirkt sich ebenfalls positiv aus, weil die Durchströmung bei ganz geöffneter Außenfassade besser gewährleistet werden kann.

7.6 Zusammenfassung

Verschiedene thermisch-energetische Gebäudesimulationsprogramme haben sich seit ca. fünfzehn Jahren in der Praxis bewährt. Zwischen Simulation und Realität kann es unterschiedlich große Differenzen geben. Ein Grund für die kritischen Stellungnahmen zur Simulation liegt im durch Benutzer selbst definierten Rechenverfahren in der Modellierung, wodurch unterschiedliche Rechen-ergebnisse bereits bei der Datenaufbereitung und -eingabe verursacht werden [62]. Die hier durchgeführte Simulationen ergibt einen Vergleichswert. Das heißt, dass die verschiedenen Fassaden unter exakt definierten identischen Randbedingungen simuliert worden sind, so dass ihre Auswirkungen miteinander unter verschiedenen Gesichtspunkten verglichen werden können. Es ist das Ziel dieser Simulation, keinen exakten Wert, sondern einen Vergleichswert zu ermitteln.

Durch die Simulationen in diesem Kapitel konnte für die Energiekosten ein positives Ergebnis für die Doppelfassade ermittelt werden. Diese Aussage beschränkt sich aber nur auf Typ 2 und 5. Typ 1 konnte auch bei großer Akzeptanz der Zulufttemperatur durch den Nutzer, sowohl im Winter als auch im Sommer, nicht positiv bewertet werden.

Zusätzlich konnte zu Doppelfassaden festgestellt werden, dass ihre Vorteile gegenüber einschaligen Fassaden maximiert werden können, wenn eine große Bandbreite der Zulufttemperatur akzeptiert wird. Ihre Wirkung ist von dieser Akzeptanz direkt abhängig. Je höher diese Akzeptanz, desto besser funktioniert eine Doppelfassade gegenüber einer einschaligen Fassade.

Ein interessantes Ergebnis liefert Kapitel 7-3 „Simulation ausschließlich mit mechanischer Lüftung“. Wenn berücksichtigt wird, dass die Hochhäuser in dieser extremgemäßigten Klimazone, wie Korea, mit einer Pfost-Riegel-Konstruktion ohne Fenster aufgrund der einfachen kostengünstigen Konstruktion noch gebaut werden, ist der Einsatz der Doppelfassade ohne offenbare Fenster, rein energetisch betrachtet, ebenfalls sinnvoll. Wie bereits ausgeführt, ist eine Klimaanlage eine Grundvoraussetzung in dieser Region. So ist die doppelschalige Fassade für den sommerlichen Betrieb sinnvoller als eine einschalige Konstruktion mit Innensonnenschutz (eine typische Konstruktion dieser Region). Gemäß der Simulation liegt der energetische Vorteil insgesamt bei etwa 20 % Energieersparnis gegenüber der einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz. Allerdings ist sie nicht besser als eine Einfachfassade mit außen- und innenliegendem Sonnen- und Blendschutz.

Bei allen Simulationen im Kapitel 7-4 ist die Gebäudenachtkühlung mit allen Gebäudespeichermassen berücksichtigt worden. Weil die einschalige Fassade ohne Automatisierung infolge der Witterungsprobleme und Einbruchsfahr eine Nachtkühlung nicht sicher gewährleisten kann, besteht ein deutlicher Unterschied beim Kühlenergiebedarf. [16] Die Nachtkühlungsmöglichkeit wird gegenwärtig bei der Hochhausplanung in Korea nicht berücksichtigt. Weil die Nachtkühlung bei der Doppelfassade konstruktiv problemlos erfolgen kann, wird der Einsatz einer Doppelfassade sinnvoll.

8 Messergebnisanalyse

8.1 Einleitung

Um gesicherte Ergebnisse zu bekommen, sind Messungen unentbehrlich. Dies gehört jedoch nicht zum Umfang dieser hier durchgeführten Forschungsarbeit. Es werden Messergebnisse der TU-München als Grundlage für die Ergebnisanalyse herangezogen [19]. Bei dieser Messung ging es insbesondere um die Auswirkung des im Fassadenzwischenraum liegenden Sonnenschutzes der Doppelfassade. Sie wurde von W. Lang durchgeführt. Dabei ist ein nach Süden orientierter Raum im Maßstab 1:1 untersucht worden.

Die notwendigen Daten wurden von ihm an den Verfasser weitergeleitet. In seiner Arbeit ging es darum, wie die thermischen Auswirkungen diverser Materialien und die Einstellbarkeit des Sonnenschutzsystems bei Doppelfassade zu beurteilen sind. In diesem Kapitel werden der sommerliche Energiedurchlass und die winterliche Zulufttemperatur bei der Doppelfassade gegenüber einschaliger Fassade behandelt. Bei Lang wurde der Raum aber nicht gekühlt.

Um genaue Werte ermitteln zu können, werden im ersten Teil die konstruktive Beschreibung und die für diese Arbeit notwendigen Daten der Arbeit von Lang näher betrachtet. Zusätzlich werden einige Annahmen für den Berechnungsvorgang getroffen. Im zweiten Teil werden die Daten mit „Excel“ weiter verarbeitet, um die Auswirkung des sommerlichen Energiedurchlasses nach der Strahlungsintensität, die direkt den Innenraum gemäß Sonnenschutzwinkel erreichen wird, zu ermitteln.

Der g-Wert besteht aus der Summe der direkten Strahlungstransmission und der sekundären Wärmeabgabe nach innen. Zur direkten Strahlungstransmission wird der Anteil gerechnet, der zum Teil durch die Transparenz des Glases direkt eindringt und zum Teil indirekt vom Sonnenschutz nach innen reflektiert wird. Die sekundäre Wärmeabgabe bedeutet den konvektiven Anteil und den Strahlungsanteil einer Wellenlänge zwischen 300 und 2500 nm. Bei den Berechnungen in diesem Kapitel werden der direkte und indirekte Strahlungsdurchlass durch die Zusammensetzung von Glas und Sonnenschutz bestimmt und die sekundäre Wärmeabgabe vom Temperaturunterschied, der sich mit dem Sonnenschutzwinkel ständig ändert, zwischen Glasoberflächen und Raumluft ermittelt. Diese drei Anteile werden separat betrachtet. Die Summe wurde als der gesamte Energiedurchlass definiert. Der gesamte Energiedurchlass, der hier ermittelt wird, bedeutet aber keinen g-Wert im klassischen Sinne. (*vergleiche Kapitel 3-4-2.*) Da noch kein allgemein gültiges Verfahren zur Ermittlung des g-Wertes bei Doppelfassade besteht, wurde hier

versucht, den möglichen gesamten Energiedurchlass bezogen auf die Strahlungsintensität von drei Fassadenvarianten zu bestimmen. Damit kann abgeschätzt werden, inwiefern eine Doppelfassade unter dem Gesichtspunkt „sommerlichen Energiedurchlass“ gegenüber der einschaligen Fassade vorteilhaft oder teilweise nachteilig ist. Ebenfalls zeigt das Ergebnis, wie die drei Anteile nach den Einstellungen des Sonnenschutzes bei ein- und doppelschaligen Fassaden beeinflusst werden.

Im dritten Teil geht es um den Vergleich der winterlichen Zulufttemperatur der einschaligen und doppelschaligen Fassaden. Wie sich die Zulufttemperatur zwischen beiden Fassaden unterscheidet, wird dort näher betrachtet.

8.2 Beschreibung des Messmodellaufbaus bei Werner Lang

8.2.1 Allgemeine Beschreibung der Messverfahren

Die Messung ist im Zeitraum von Januar bis Juli 1999 am Standort München erfolgt. Während dieses Zeitraumes sind unterschiedliche Lamellensysteme mit diversen Einstellungen wechselnd untersucht worden. Zu den Lamellensystemen gehören Holz, Holz+Alu und Alu. Zu den variablen Einstellung gehören offen, geschlossen und im Wechselmodus. Bei dem Messverfahren sind 14 Messungen nacheinander durchgeführt worden. Die Daten, die hier für diese Forschungsarbeit erforderlich sind, und stationär betrachtet werden, sind die der Messreihe vom 22. bis 31. Januar für den Winterfall und vom 19. Juni bis 23. Juli für den Sommerfall.

Für den Winterfall kommen hier in Betracht 31. Januar um 06:30 Uhr für die Nachtbetrachtung ohne Sonnenstrahlung und 23. Januar um 15:30 Uhr für die Tagesbetrachtung mit Sonnenstrahlung. Während dieses Zeitraumes ist die Messung ohne Sonnenschutz durchgeführt worden.

Die im Zeitraum vom 19. Juni bis zum 23. Juli durchgeführte Messung kommt für den Sommerfall in Betracht. In dieser Zeit ist der Sonnenschutz horizontal eingestellt. Für die Berechnung des sommerlichen Energiedurchlasses nach innen wird das Ergebnis vom 4. Juli um 15:00 Uhr weiter analysiert. Hier ist der Sonnenschutz offen, horizontal eingestellt, damit das Eindringen der direkten Strahlung verhindert wird.

8.2.2 Konstruktiver Aufbau der Doppelfassade

Der Testraum ist 350 (breit) \times 270 (hoch) \times 304,5 (tief) cm³ groß. Nach der Klassifikation, die im Kapitel 5 durchgeführt worden ist, handelt es sich um eine Doppelfassade vom Typ 1. Die wichtigen Eigenschaften dieser Fassade sind folgende.

Allgemein	
Tiefe des Fassadenzwischenraumes	805 mm
Abstand zwischen Isolierverglasung und Lamellenachse	575 mm
Abstand zwischen Lamellenvorderkante und Innenseite der ESG-Verglasung	100 mm
Äußere Fassade	
Einfachverglasung aus ESG	
Dicke der Scheibe	10 mm
Höhe der Lüftungsöffnungen (oben und unten)	150 mm (beträgt 11 % der gesamten Außenfassade)
Transmissionsgrad	0,86
Reflektionsgrad	0,08
Absorptionsgrad	0,06
k-Wert (W/m ² K)	5,6
Innere Fassade	
Gesamte Dicke der Isolierverglasung mit Argonfüllung	16 mm
Dicke der äußeren Scheibe	4 mm
Dicke der inneren Scheibe	6 mm
Transmissionsgrad	0,46
Reflektionsgrad	0,30
Absorptionsgrad	0,24
k-Wert (W/m ² K)	1,37
Sonnenschutz Eigenschaft	
Lamellenbreite	250 mm
Lamellenlänge	1626 mm
Vertikaler Achsenabstand der Lamellen	240 mm
Reflektionsgrad	50 %
Absorptionsgrad	50 %

Tabelle 34: Konstruktionsbeschreibung bei der Messung

8.3 Berechnung des sommerlichen g-Wertes

8.3.1 Berechnungsvoraussetzung für den Sommerfall

Für das Verfahren im Kapitel 8-3-4 sind einige Annahmen zu den Messergebnissen notwendig. Die wichtigste ist die Annahme beim Temperaturverlauf im Fassadenbereich. Bei den klimatisierten Räumen im Sommer liegt die höchste Raumtemperatur bei 26 °C. Bei dieser Messung gab es keine Klimatisierung, so dass die Raumtemperatur bei 34,9 °C liegt. Dies zeigt der Temperaturverlauf C-E-A in der Abbildung 29. Wenn die Raumtemperatur mit 26 °C wie beim realen Fall angenommen wird, dann sollte die Oberflächentemperatur der inneren Isolierverglasung, die eine wichtige Rolle beim Einfluss auf den g-Wert spielen kann, deutlich sinken, wie der Temperaturverlauf D-F-B zeigt. Für die Berechnung aber bleibt die Oberflächentemperatur bei 37,1°C. Dies ist eine Abweichung vom realen Fall. Damit wird eine schlechtere Situation als der Realfall berechnet, wie die Temperaturgradientenkurve C-E-F-B zeigt. Aus diesem Grund würde der tatsächliche g-Wert etwas niedriger liegen. Allerdings wird der Wärmedurchgang beim nicht gekühlten Innenraum kleiner, weil die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen kleiner ist.

Das Ergebnis dieser Berechnung wird anschließend mit dem Ergebnis der einschaligen Fassaden mit außen- und innenliegendem Sonnenschutz verglichen. Die bei der Messung benutzte innere Isolierverglasung und der Sonnenschutz mit den in Tabelle 34 beschriebenen Eigenschaften sind für die beiden Berechnungen verwendet worden. Die Ergebnisse dieser drei verschiedenen Fassadentypen liegen im Kapitel 8-3-4 vor.

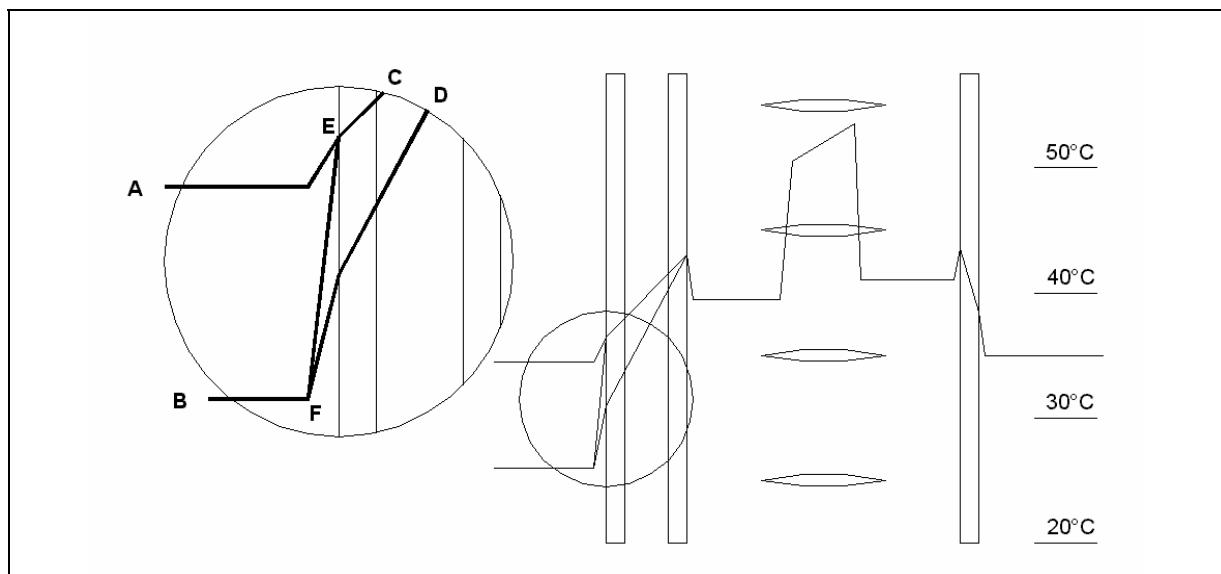


Abbildung 29: Annahme des Temperaturgradienten des Messergebnisses

100% (Sonnenschutz offen)	75%	50% (Vollbeschattung)
25%	0% (absolute Dunkelheit)	I : Strahlungsintensität dk : direkter Strahlungsdurchgang ik : indirekter Strahlungsdurchgang r : Reflektion nach außen a : Absorption am Sonnenschutz

Abbildung 30: Anteil des Strahlungsdurchganges nach innen in %

Als weiterer Punkt bei der Berechnung ist die Strahlung nach innen und außen zu berücksichtigen. Dabei wird der Anteil des Strahlungsdurchganges, der z. T. nach innen eindringt, zum anderen Teil am Sonnenschutz absorbiert und nach innen und außen reflektiert nach Sonnenschutzwinkel dargestellt. 100 % bedeutet hierbei, dass der Sonnenschutz offen ist, oder der Winkel des Sonnenschutzes gleich mit der Sonnenhöhe ist. Bei diesem Punkt ist der direkte Strahlungsanteil nach innen am höchsten. Mit steigendem Sonnenschutzwinkel nehmen sowohl der Reflektionsgrad nach innen als auch der Absorptionsgrad des Sonnenschutzes gleichzeitig bis zur Vollbeschattung des Raumes zu. Ab 50% (Vollbeschattung) beträgt der direkte Strahlungsanteil nach innen null, nimmt der Reflektionsanteil nach außen zu und bleibt der Absorptionsanteil am Sonnenschutz konstant. Bei 0 % (absoluter Dunkelheit) wird der Reflektionsanteil nach außen maximal. Die Abbildung 30 weist auf dieses Verhältnis hin. Der Anteil des Strahlungsdurchganges nach innen reduziert sich bei den folgenden Berechnungen mit einem Abstand von 5%. Diese Betrachtung ist nur theoretisch möglich, und es wurde dabei vernachlässigt, dass Reflektion-, Absorption- und Transmissionsgrad von Glas und Sonnenschutz abhängig vom Einfallswinkel der Strahlung sind.

8.3.2 Messergebnis am 4. Juli um 15:00 Uhr für den Sommerfall

Sommerfall	15:00, 4. Juli
Vertikale Globalstrahlungsintensität	500 W/m ²
Außentemperatur T _L	+34,7 °C
Vor dem Sonnenschutz	
Temp. äußere Einfachverglasung außen T _O ($\alpha=17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für den windstillen Tag angenommen)	+40,3 °C
Temp. äußere Einfachverglasung innen T _O	+43,9 °C
Fassadenzwischenraumtem. T _L unten	+39,1 °C
Fassadenzwischenraumtem. T _L Mitte	+41,3 °C
Fassadenzwischenraumtem. T _L oben	+41,9 °C
Sonnenschutz	
Temp. äußere Oberfläche	+53,5 °C
Temp. innere Oberfläche	+50,9 °C
Hinter dem Sonnenschutz	
Fassadenzwischenraumtem. T _L unten	+37,2 °C
Fassadenzwischenraumtem. T _L Mitte	+39,3 °C
Fassadenzwischenraumtem. T _L oben	+39,9 °C
Temp. Isolierverglasung außen T _O	+42,9 °C
Temp. Isolierverglasung innen T _O	+37,1 °C
Raumtemperatur T _L	+34,9 °C
Raumtemperatur T _L (angenommen für Berechnung)	+26,0 °C

Tabelle 35: Messergebnis am 4. Juli um 15:00 Uhr (siehe Abbildung 29.)

8.3.3 Bilanzierung der Wärmeübertragung im Sommer aus dem Messergebnissen**Direkter Strahlungsdurchgang**

Da der nach Süden orientierte Messraum um 15:00 am 4. Juli eine Vollverschattung hat, beträgt der direkte Strahlungsdurchgang nach innen 0%. Der Anteil des Strahlungsdurchganges nach innen ist daher der von der am Sonnenschutz reflektierten indirekten Strahlung. Dieser kann vereinfacht ermittelt werden.

Der Anteil des indirekten Strahlungsdurchganges, der am Sonnenschutz reflektiert und nach innen gelangt, beträgt 19,8 %. Er ergibt sich durch den Transmissionsgrad der äußeren Verglasung von $0,86 \times 0,50$ Reflektionsgrad des Sonnenschutzes $\times 0,46$ Transmissionsgrad der inneren Verglasung. Dieser führt zu 99 W/m² bei der Globalstrahlung 500 W/m², und insgesamt 935,55 W bei einer Fensterfläche von $A_{\text{Fenster}}=9,45 \text{ m}^2$.

Der Reflektionsanteil nach außen beträgt 13.5 %. Der ergibt sich durch den 0.08 Reflektionsanteil der äußeren Verglasung und den von der inneren Verglasung verursachten 0.055 Reflektionsanteil. Dieser führt zu $67,7 \text{ W/m}^2$ bei der Globalstrahlung 500 W/m^2 , und insgesamt $640,1 \text{ W}$ bei $A_{\text{Fenster}}=9,45$.

Sekundäre Wärmeabgabe

Für die Wärmebilanz des Fassadenzwischenraumes wird als erstes die Kühllast des Fassadenzwischenraumes als die dort absorbierte Strahlung berechnet. Wenn die nach innen transmittierte und nach außen reflektierten Anteile und die Kühllast der Globalstrahlung berücksichtigt werden, dann ergibt sich die Summe der gesamten sekundären Wärmeabgabe nach innen und außen. Nach Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten nach innen und außen werden die sekundäre Wärmeabgabe nach innen und außen ermittelt.

Für die Berechnung der Kühlleistung ist die Luftgeschwindigkeit w_2 in der Abströmöffnung erforderlich. Diese berechnet sich infolge des thermischen Auftriebes bei einem bestimmten Austrittsquerschnitt. (siehe Gleichung 14.)

$$w_2 = \sqrt{\frac{H g \Delta t}{T_m \left(1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)}} = \sqrt{\frac{2,7 \times 9,81 \times (312,8 - 307,7)}{(39,8 + 273) \times \left(1 + \left(\frac{0,525}{0,525} \right)^2 \right)}} = 0,46 \text{ m/s}$$

w_2	:	Luftgeschwindigkeit in der Abströmöffnung (m/s)
H	:	Höhe zwischen Zu- und Abluftöffnung 2,7 (m)
g	:	Fallbeschleunigung $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$
Δt	:	Temperaturdifferenz zwischen T_m und absoluter Außenlufttemperatur 5,1 (K)
T_m	:	Mittlere absolute Temperatur im Fassadenzwischenraum 312,8 (K)
A_1	:	Größe der Lufteintrittsöffnung unten 0,525 (m^2)
A_2	:	Größe der Luftaustrittsöffnung oben 0,525 (m^2)

Damit wird eine Luftgeschwindigkeit von 0,46 m/s in der Abströmöffnung berechnet. Der Volumenstrom kann mit der Geschwindigkeit und der Fläche $V = A_1 \times w_1 = A_2 \times w_2$ berechnet werden. Mit der im Raum erwärmten Luft wird die Kühlleistung \dot{Q} ermittelt. Sie ergibt sich nach den Regeln der Kühllastberechnung. (siehe Gleichung 15.)

$$\dot{Q} = w_2 \times A_2 \times \rho \times c_p \times \Delta t = 0,46 \times 0,525 \times 1,2 \times 1,0 \times (314,9 - 307,7) = 2,086 \text{ kW}$$

\dot{Q}	:	Kühllast (kW)
w_2	:	Luftgeschwindigkeit 0,3 (m/s)
ρ	:	Dichte 1,2 (kg/m ³)
c_p	:	die spezifische Wärme der Luft 1,0 (kJ/m ³ K)
A_2	:	Größe der Luftaustrittsöffnung 0,525 (m ²) (Öffnungsfläche gleich Strömungsfläche, daher $\phi = 1$ angenommen)
Δt	:	Temperaturdifferenz zwischen T_{Abluft} und Außenlufttemperatur 7,2 (K) (T_{Abluft} als obere T_L 41,9 °C im Fassadenzwischenraum angenommen)

\dot{q} beträgt dadurch 220,7 W/m². Dadurch ergibt sich die sekundäre Wärmeabgabe nach innen und außen $500 - (220,7 + 99 + 67,7) = 112,6$ W/m². Bei der Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha=8$ W/(m²K) nach innen beträgt die sekundäre Wärmeabgabe nach innen 8 W/(m²K) \times (37,1°C – 34,9°C) = 17,6 W/m². Die restlichen 95,6 W/m² bedeutet die sekundäre Wärmeabgabe nach außen. Bei der Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha=17$ für den windstillen Tag ergibt sich die Oberflächentemperatur 40,3 °C der äußeren Verglasung.

Auswertung

Die Abbildung 31 zeigt die Wärmebilanz aus dem Messergebnis. Im stationären Zustand beträgt der gesamte Energiedurchlass 116,6W/m² bzw. 23,32% bezogen auf die Strahlungsintensität. Dieser niedrige gesamte Energiedurchlass konnte nur dadurch entstehen, dass die Raumlufthtemperatur t_L 34,9 °C vom Messergebnis verwendet wurde. Wenn aber die sommerlich realistische Raumlufthtemperatur t_L als 26 °C angenommen wird, steigt der gesamte Energiedurchlass infolge des größeren Temperaturunterschiedes zwischen Raumlufth und Glasoberflächen.

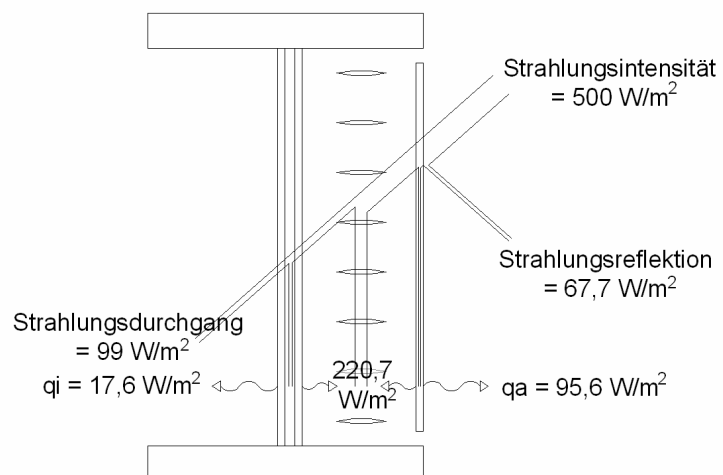
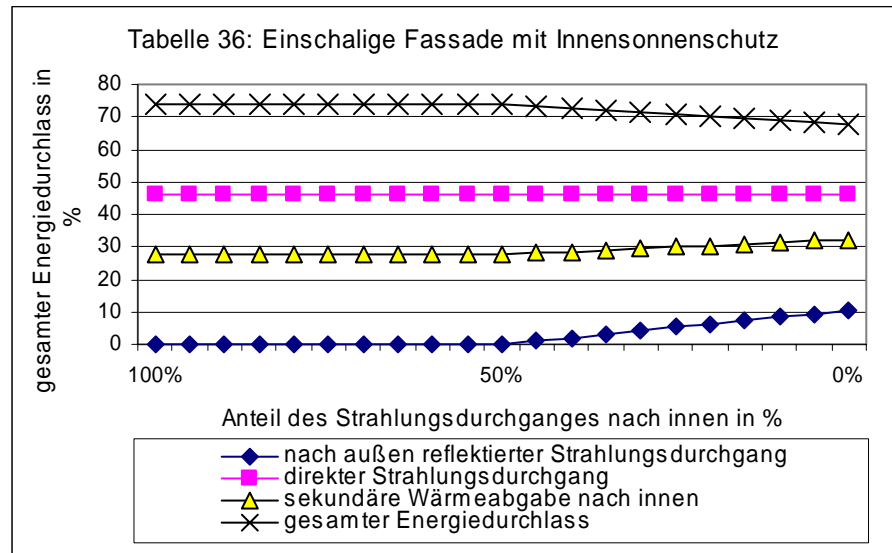
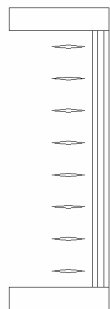


Abbildung 31: Energiebilanz aus dem Messergebnis

8.3.4 Vergleich des gesamten Energiedurchlasses im Sommer von ein- und doppelschaligen Fassaden

Einschalige Fassade mit Innensonnenschutz

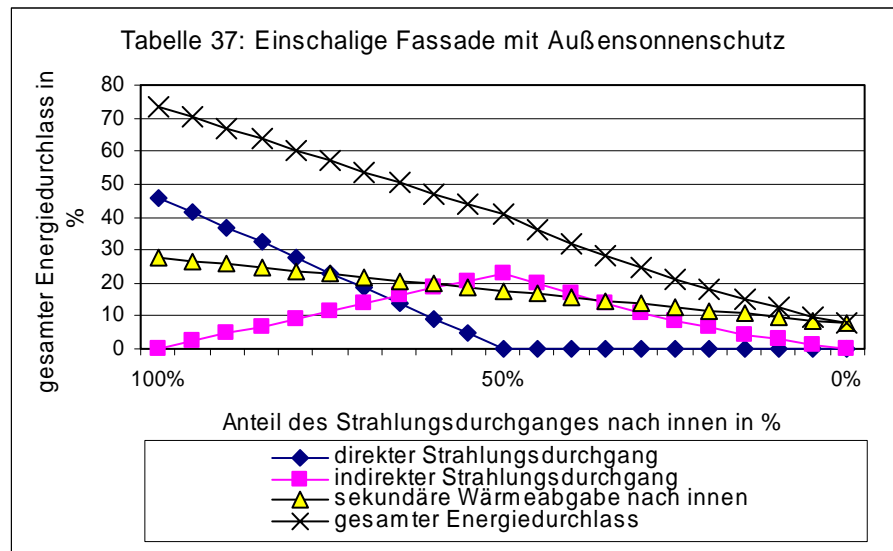
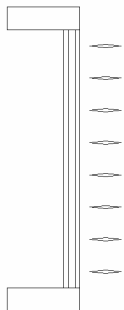


Der Anteil des direkten Strahlungsdurchganges bleibt in der einschaligen Fassade mit Innenschutz unabhängig von der Sonnenschutzzeinstellung konstant, weil die direkte Strahlung durch die Verglasung ungehindert eindringt. Entscheidend ist der nach außen reflektierte Strahlungsanteil, der bis zur Vollbeschattung des Raumes null beträgt und bei der weiter steigenden Geschlossenheit des Sonnenschutzes zunimmt. Mit dem nach außen zunehmenden Reflektionsanteil infolge des steigenden Sonnenschutzwinkels steigt auch die Oberflächentemperatur der Verglasung leicht, weil die Verglasung mehr Wärme absorbiert. Damit nimmt gleichzeitig die sekundäre Wärmeabgabe nach innen zu. Der nach außen reflektierte Strahlungsanteil liegt aber leicht höher als der von der sekundären Wärmeabgabe nach innen. Mit diesem Vorgang kann der gesamte Energiedurchlass mit steigendem Sonnenschutzwinkel leicht reduziert werden. Bei der absoluten Dunkelheit bleibt der gesamte Energiedurchlass immer noch über 67%. Die Auswirkung des Sonnenschutzes ist in diesem Fall nahezu wirkungslos. Der Sonnenschutz bietet hier nur eine Blendschutzwirkung an.

Einschalige Fassade mit Außensonnenschutz

Der größte Vorteil des außenliegenden Sonnenschutzes liegt darin, dass der Anteil des direkten Strahlungsdurchganges schon bei Vollbeschattung des Raumes bis null

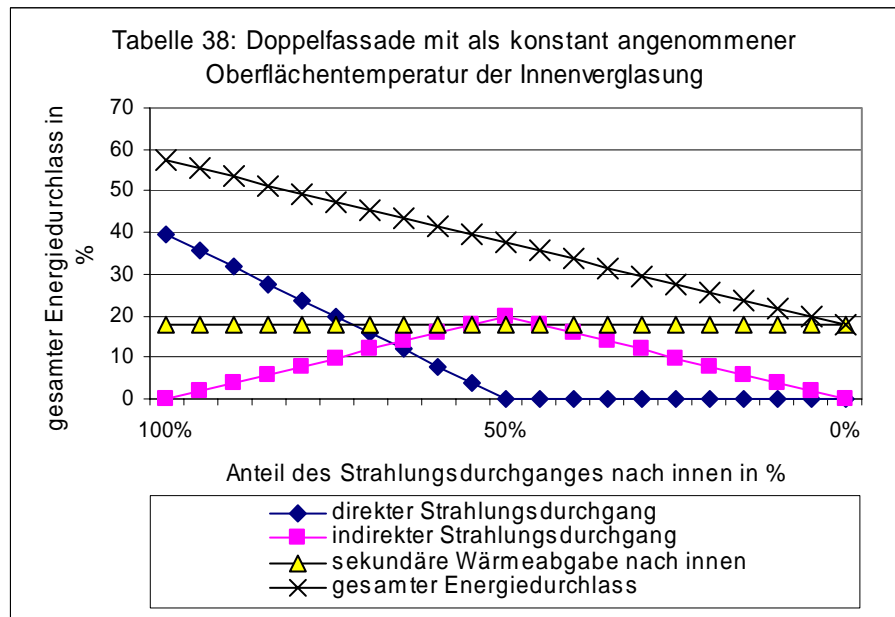
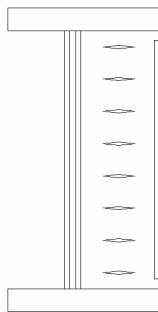
reduziert werden kann. Während die Zunahme der nach außen reflektierten Strahlung bei der einschaligen Fassade mit innen liegendem Sonnenschutz einen niedrigeren gesamten Energiedurchlass bedeutet, ist die am Sonnenschutz absorbierte und nach außen reflektierte Strahlung beim außen liegenden Sonnenschutz für einen niedrigeren gesamten Energiedurchlass entscheidend. Es besteht der größte Unterschied zwischen Innen- und Außensonnenenschutz. Die Berechnung zeigt, dass der Anteil vom direkten Strahlungsdurchgang bei 100% (offenem Sonnenschutzstand) maximal und schon ab 50 % null beträgt, während der vom indirekten Strahlungsdurchgang bei 100 % null, bei 50 % maximal und bei 0 % wieder null beträgt. Die sekundäre Wärmeabgabe sinkt ebenfalls mit dem steigenden Sonnenschutzwinkel, weil die Oberflächentemperatur der Verglasung infolge der Abnahme der Strahlungsabsorption ebenfalls abfällt. Insgesamt gesehen ist mit einem Außensonnenenschutz eine klare Regulierbarkeit der Sonnenstrahlung möglich. Der gesamte Energiedurchlass kann von 73 bis 7% variieren.



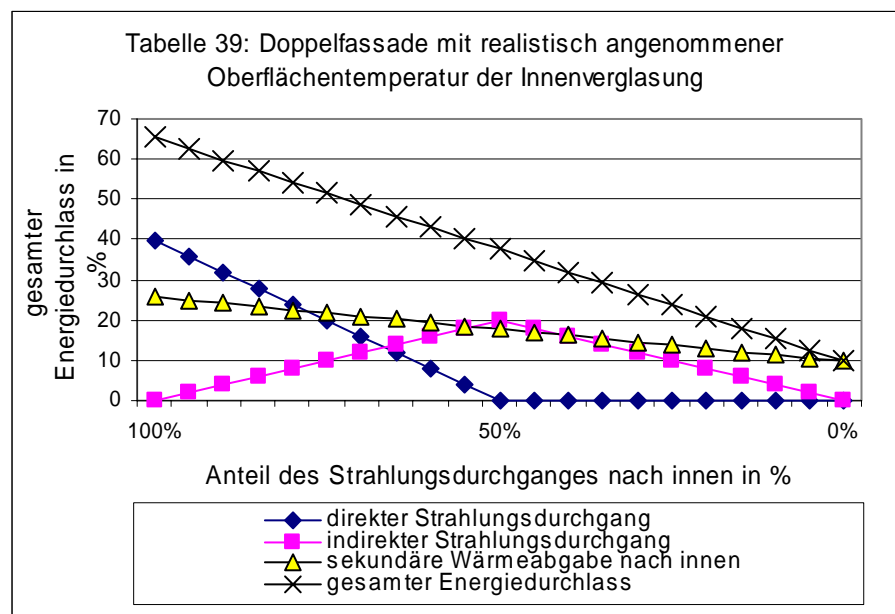
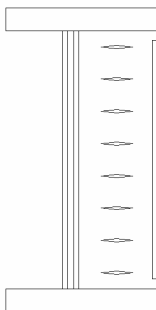
Doppelschalige Fassade mit als konstant angenommener Oberflächentemperatur der Innenverglasung

Der Vorteil einer einschaligen Fassade mit Außensonnenenschutz ist ebenfalls bei doppelschaligen Fassaden gegeben. Der Anteil des direkten und indirekten Strahlungsdurchganges kann ebenfalls bei der absoluten Dunkelheit auf null reduziert werden. Wenn die Oberflächentemperatur der inneren Isolierungsverglasung mit konstant 37,1°C angenommen wird, so dass die sekundäre Wärmeabgabe nach innen konstant bleibt, nimmt der gesamte Energiedurchlass

ausschließlich abhängig von dem Strahlungsdurchgang ab. Je nach Reflektionsanteil liegt der gesamte Energiedurchlass zwischen 57 und 17,8%.



Doppelschalige Fassade mit realistisch angenommener Oberflächentemperatur der Innenverglasung

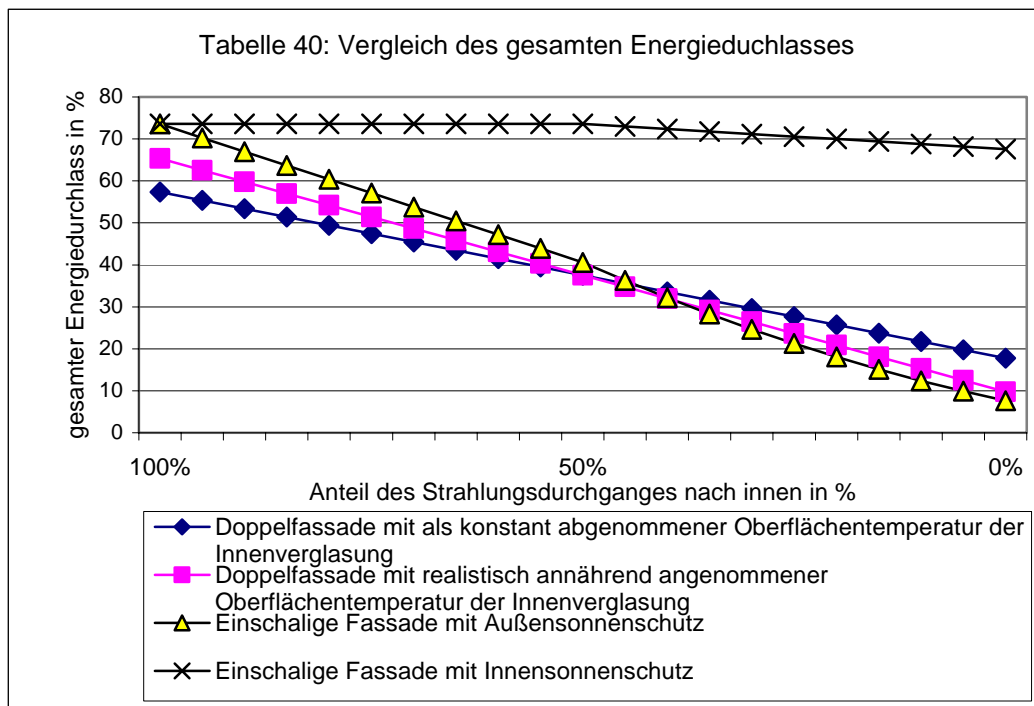


Beim realen Fall ändert sich die Oberflächentemperatur der inneren Isolierverglasung je nach Reflektionsanteil nach innen. Hier ist eine leichte Reduzierung dieser Temperatur wie bei der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz angenommen

worden, um einen realen Fall zu simulieren. Mit steigendem Sonnenschutzwinkel nimmt dann der Anteil der sekundären Wärmeabgabe nach innen ab. Der gesamte Energiedurchlass variiert in diesem Fall von 65 bis 9 %. Hiermit kann ein niedriger Energiedurchlass erreicht werden.

Vergleich des gesamten Energiedurchlasses

Hier wird der gesamte Energiedurchlass der diversen Fassade gemäß des Sonnenschutzwinkels verglichen. Auf den ersten Blick kann eindeutig festgestellt werden, dass die einschalige Fassade mit Innensonenschutz weder einen akzeptablen Vergleichswert zu anderen Variationen noch insgesamt einen wirkungsvollen Sonnenschutz aufweist. Der gesamte Energiedurchlass der Doppelfassade mit konstanter Oberflächentemperatur von 37,1°C kommt infolge der voraussichtlich großen Abweichung nicht in den Betracht. Deshalb werden hier die Ergebnisse der Doppelfassade mit realistisch angenommener Oberflächentemperatur der Innenverglasung und der einschaligen Fassade mit Außensonenschutz diskutiert.



Der gesamte Energiedurchlass von Doppelfassade liegt bis Vollbeschattung (bis ca. 45% Strahlungsdurchgang nach innen) niedriger als der von der einschaligen Fassade mit Außensonenschutz. Von der Vollbeschattung bis absolute Dunkelheit liegt aber der gesamte Energiedurchlass der Doppelfassade leicht höher als der der einschaligen Fassade mit Außensonenschutz.

8.4 Bewertung der Zulufttemperatur im Winter

Der folgende Auszug aus der Messung zeigt die winterlichen Ergebnisse.

Winterfall	06:30, 31. Jan.	15:30, 23. Jan.
Vertikale Globalstrahlungsintensität	-	640 W/m ²
Außentemperatur T_L	-7,4 °C	+5 °C
Fassadenzwischenraumtem. T_L	-6,6 °C	+9,0 °C
ΔT_L Außen und Fassadenzwischenraum	0,8 K	4 K

Tabelle 41: Messergebnis an Wintertagen

Am frühen Morgen der 31. Januar liegt die Temperatur (-6,6 °C) im Fassadenzwischenraum etwa höher als die Außenlufttemperatur (-7,4 °C). Der Temperaturunterschied beträgt nur 0,8 K und bedeutet eine geringfügige Reduzierung der Transmissionswärmeverluste.

Um 15:30 am 23. Januar fällt das Ergebnis anders aus. Bei der Strahlungsintensität von 640 W/m² steigt die Temperatur (+9°C) im Fassadenzwischenraum gegenüber der Außentemperatur (+5 °C) um 4 K an. Dieser Temperaturunterschied kann die Reduzierung der Wärmeverlust sowohl infolge der Transmission durch die Verglasung als auch infolge der Lüftung des Raumes darstellen. Bei einer Raumlufttemperatur von 22°C kann der Transmissionswärmeverlust durch die Verglasung ein Viertel reduzieren. Ebenfalls ein Viertel kann der Lüftungswärmeverlust des Raumes bei Fensterlüftung betragen. Bei Fensterlüftung kann diese Temperatur (9°C) als akzeptablere Zulufttemperatur als die Zulufttemperatur (+5 °C) bei der einschaligen Fassade angesehen werden. Die Zulufttemperatur (+5 °C) bei einer einschaligen Fassade im Winter kann die Nutzeranforderung nach ausreichender Behaglichkeit schwer erfüllen.

8.5 Zusammenfassung

Bei der Berechnung wurden gleiche Sonnenschutzeinrichtungen mit 50 % Absorptionsgrad und 50 % Reflektionsgrad für einen neutralen Vergleich von drei Variationen verwendet. Die einschalige Fassade mit innenliegendem Sonnenschutz hat im Sommer einen relativ konstanten Verlauf des gesamten Energiedurchlasses, unabhängig von dem Sonnenschutzwinkel. Dies Ergebnis ändert sich ebenfalls nicht sehr stark bei einem Sonnenschutz mit einem hohen Reflektionsgrad. Zum Beispiel bei einem Sonnenschutz mit einem hohen Reflektionsgrad von 80 % liegt der gesamte Energiedurchlass bei absoluter Dunkelheit etwas höher als 70 %, da die

innere Glasoberflächentemperatur infolge der an der Fassade absorbierten Strahlung mit steigendem Reflektionsgrad des Sonnenschutzes ebenfalls steigt, so dass die sekundäre Wärmeabgabe nach innen steigt. Aus diesem Zusammenhang kann eine effektive Sonnenschutzwirkung des innen liegenden Sonnenschutzes überhaupt nicht erwartet werden. Der außen liegende Sonnenschutz macht Sinn zum Einsatz im Sommer. Weiter konnte bewiesen werden, dass der gesamte Energiedurchlass der Doppelfassade im Sommer, abhängig von Sonnenschutzwinkel, geringfügig höher oder niedriger als der bei der einschaligen Fassade mit außen liegendem Sonnenschutz liegt. Wenn ein niedrigerer gesamter Energiedurchlass im Sommer bei Doppelfassaden gewährleistet werden soll, dann ist die von Typ 3 oder 5 die Lösung, da diese Typen infolge der großflächig offenbaren Außenfassade eine ausreichende Hinterlüftung zum Fassadenzwischenraum gewährleisten und keine Kühllast im Fassadenzwischenraum erzeugen. (*siehe Objekt 7.*)

Der Vergleich der winterlichen Zulufttemperatur zwischen ein- und doppelschaligen Fassaden hat gezeigt, dass das Ergebnis der doppelschaligen Fassade von Typ 1 etwas vorteilhafter ist. Jedoch darf nicht vergessen werden, dass ein deutlich besseres Ergebnis bei Typ 2, 3, 4 und 5 erwartet werden kann, weil der Volumenstrom zum Fassadenzwischenraum bei diesen Typen regelbar ist und dadurch die Temperatur im Fassadenzwischenraum noch höher liegen kann.

9 Schlussbetrachtung

9.1 Einleitung

Die Arbeit befasste sich mit klimagerechten Fassaden. Ausgehend von einer theoretischen Betrachtung wurden Beispiele untersucht sowie Simulationen und eine Messergebnisanalyse durchgeführt. Zum Schluss werden die durchgeführten Ergebnisse bewertet und analysiert.

Zunächst geht es um die Einsatzmöglichkeiten von klimaoptimierten Fassaden. Es wird dargestellt, in welcher Klimaregionen welche Fassade prinzipiell optimal funktioniert. Das Simulationsergebnis dient hierbei als Entscheidungsgrundlage. Die optimale Einsatzbreite der jeweiligen Fassade wird bezogen auf die Einsatzdauer der möglichen Fensterlüftung grafisch nach Jahreszeit und Orientierung dargestellt.

Als zweites werden die Doppelfassaden typologisch zusammengefasst. Unabhängig von Vor- und Nachteilen der jeweiligen Fassadenausführungen wird allgemein die konstruktive und wirtschaftliche Problematik der bisher ausgeführten Doppelfassaden erörtert. So kann festgestellt werden, wo in der Zukunft die Einsatz- und Entwicklungspotenziale der Doppelfassade zu sehen sind.

Als drittes wird die grundsätzliche Problematik hoher Gebäude mit Glasfassaden betrachtet. Dabei geht es insbesondere um das Grenzsichtenproblem.

9.2 Einsatz der verschiedenen Fassaden

Wenn die regionale Architektur eine Konsequenz aus den klimatischen Bedingungen ist, sind die Fassadenausführungen in der Lage, diese meteorologischen Gegebenheiten in die Architektur weiter zu integrieren. Entscheidend ist dabei, dass die Fassade (Gebäudehülle) die Sonnenstrahlung ohne zusätzlichen Energieaufwand filtern, durchlassen oder umwandeln kann. Je nach meteorologischen Bedingungen sollten unterschiedliche Fassadenkonzepte, wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, zum Einsatz kommen. Die folgende Zusammenfassung bezieht sich jedoch nur auf Verwaltungsbauten mit hoher interner Wärmelast.

In kalten Regionen geht es hauptsächlich nicht um Sonnenschutzprobleme sondern vor allem um den Blendschutz bei Sonneneinstrahlung. Daher ist eine einschalige Fassade mit Innensonnenschutz in diesen Regionen die ideale und einfachste Lösung. Da meistens ganzjährig vor allem eine Heizlast in diesen Regionen gegeben

ist, ist das Hauptziel bei gutem Wärmeschutz ein minimaler Heizenergiebedarf [63]. Aus diesem Grund bietet der Innensonnenschutz sowohl den besten Strahlungswärmeeinlass zur passiven Sonnenenergienutzung als auch den optimalen Blendschutz. Je nach Strahlungsintensität und Orientierung ist das Heizen bei Verwaltungsbauten infolge der hohen Wärmequellen zeitweise auch überflüssig. In warmen Regionen ist der Einsatz des Innensonnenschutzes allein hingegen immer kritisch zu bewerten, weil die interne Last dadurch deutlich erhöht wird.

In warmen Regionen geht es auch um den optimalen Sonnenschutz. Hier ist der Einsatz eines Außensonnenschutzes sinnvoll, damit das Eindringen der Sonnenstrahlung in den Raum zum Teil bzw. ganz je nach Sonnenschutzeinstellung verhindert werden kann. Problematisch ist aber der Einsatz nur eines Innensonnenschutzes in warmen Regionen, weil der keine optimale Abschirmung gegen die Sonneneinstrahlung darstellen kann. (siehe Kapitel 8.3.4.) Ebenfalls ist der Einsatz nur eines Außensonnenschutzes in kalten Regionen problematisch, weil bei steigendem Sonnenschutzwirkung eine passive Nutzung der Solareinstrahlung erschwert wird.

Differenzierter muss der Einsatz eines Sonnenschutzes in den gemäßigten Regionen betrachtet werden, da sowohl die passive Nutzung der Sonneneinstrahlung im Winter als auch der optimale Sonnenschutz im Sommer zu fordern sind. Ein Sonnenschutz, der entweder im Winter (innenliegend) oder im Sommer (außenliegend) eine ideale Lösung darstellt, wirkt sich negativ auf die jeweilige andere Jahreszeit aus. Die Fassade muss sowohl für kaltes als auch heißes Klima optimiert werden. Der gemeinsame Einsatz eines Außensonnenschutzes und eines Innenblendschutzes ist daher die ideale Lösung. Diese Maßnahme kann den Energiehaushalt eines Gebäudes in hohem Umfang optimieren, wie die Simulationsergebnisse zeigen. In diesem Zusammenhang könnte die Ausführung einer Doppelfassade auch eine sinnvolle Lösung sein, weil die Fassade selbst je nach klimatischen Bedingungen anders eingestellt werden kann. Jedoch ist dafür auf eine sorgfältig geplante und richtig konzipierte Doppelfassadenkonstruktion zu achten. Nach der hier vorgesehenen Methodik werden Doppelfassaden in die Typen 1 bis 5 (zusätzlich Sonderkonstruktion 6) klassifiziert. Die Simulationen nach dieser Einteilung zeigen, dass die Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Doppelfassadentypen unterschiedlich ausfallen. Aus diesem Grund sollte der Einsatz und Typ einer bestimmten Doppelfassade je nach meteorologischen und konstruktiven Bedingungen entschieden und optimiert werden.

9 Schlussbetrachtung

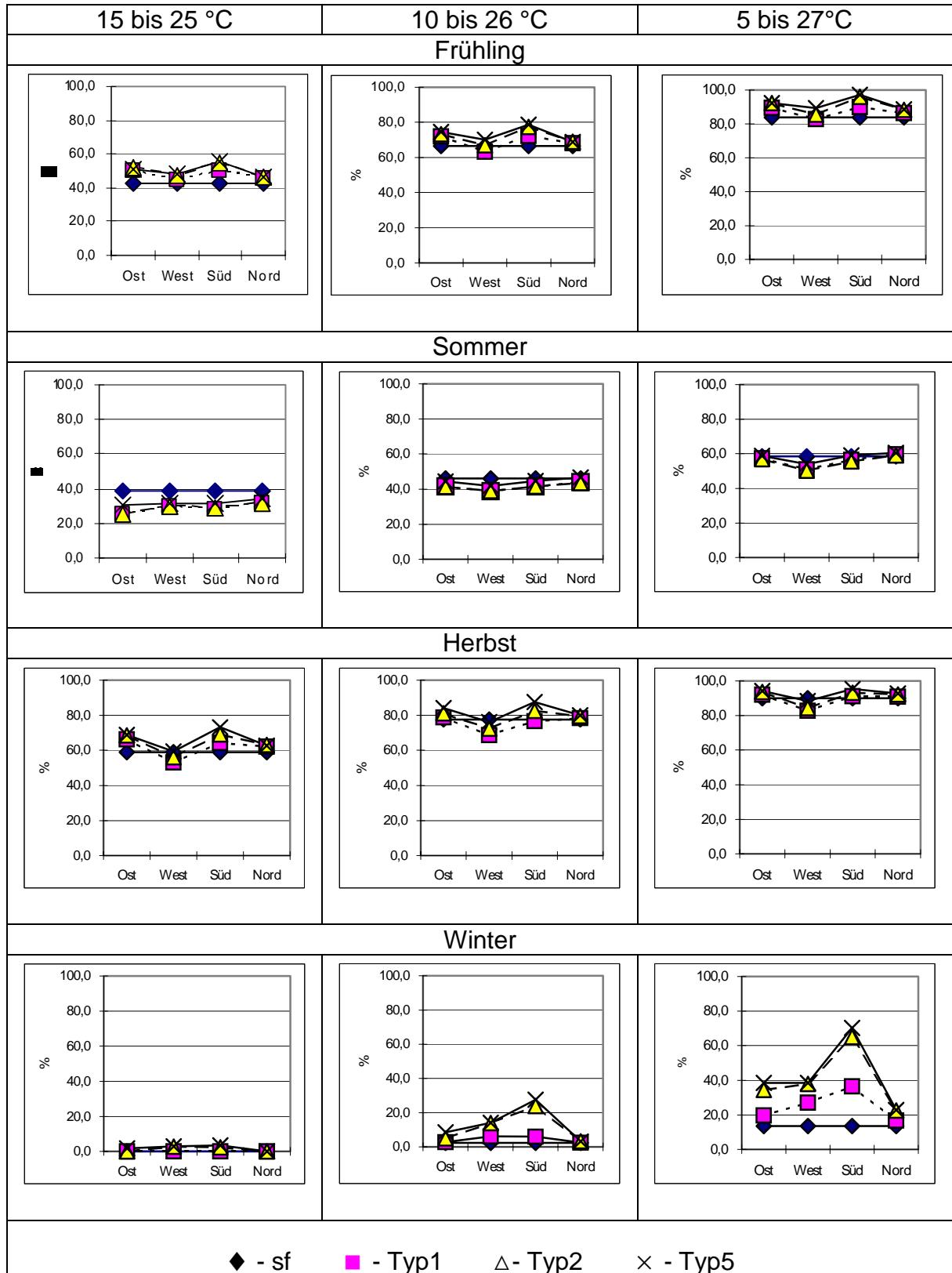


Abbildung 32: Möglicher Nutzungsdauervergleich nach Jahreszeit und Büroorientierung in % in Folge der Bandbreite der Zulufttemperatur
(Siehe Kapitel 7-5-1 und Anhang B)

In Abbildung 32 sind die Simulationsergebnisse von möglichen Nutzungsdauern der verschiedenen Fassaden für die Fensterlüftung von Büros in Ost-, West-, Süd- und Nordorientierung prozentual dargestellt. Die Betrachtung bezieht sich nur auf die Arbeitszeit. Typ 5 hat einen breiteren Einsatzbereich als Typ 1 und 2. In den Übergangszeiten ist die Einsatzdauer für Fensterlüftung von Doppelfassaden mehr oder weniger identisch mit der einschaligen Fassade. Im Sommer verkürzt sich die Einsatzdauer von Doppelfassaden gegenüber einschaligen Fassaden. Im Winter kann eine Fensterlüftung bei Doppelfassaden desto länger eingesetzt werden, je niedriger die Außenzulufttemperatur akzeptiert wird. Während eine ausreichend behagliche Fensterlüftung bei der einschaligen Fassade im Winter kaum zum Einsatz kommen kann, zeigen sich bei den Doppelfassaden deutliche Unterschiede bei allen 4 Büroausrichtungen. Das Südbüro ist im Bezug auf die Fensterlüftungszeiten immer als vorteilhaft zu sehen, unabhängig von der Zulufttemperatur. Das größte Potenzial liegt daher beim Südbüro.

Trotz dieser grundsätzlich positiven Aussage zu Doppelfassaden muss gesagt werden, dass die Fensterlüftungsmöglichkeit je nach Fassadenausführung (sowohl der Außen- als auch Innenfassade) sehr unterschiedlich ausfällt. Das Ergebnis der Simulationen mit Trnsys hat einen Überblick gegeben, wieweit Fensterlüftung überhaupt möglich ist. Damit konnte die konstruktive Logik der Außen- und Innenfassadenausführung bei der Planung dargestellt werden.

9.3 Problematik der derzeitig gebauten Doppelfassaden

Die „Doppelfassade“ hat ein sehr einfaches Funktionsprinzip, um Sonnenenergie zu nutzen. Jedoch genügen Doppelfassaden nicht grundsätzlich allen Anforderungen. Doppelfassaden sind definitiv kein allgemeingültiges Mittel zur Energieeinsparung. Eine Doppelfassade hat immer Vor- und Nachteile. Ein Vorteil aller Doppelfassaden gegenüber einschaligen Fassaden ist eine sichere Gebäudenachtkühlung. Gleichzeitig sind jedoch die Vorteile auch mit Nachteilen bei ganzjähriger Betrachtung verbunden. Zu diesen gehören insbesondere erhöhte Kosten.

In der Arbeit zeigt sich, dass Doppelfassaden ganz unterschiedliche thermische Auswirkungen haben können, sie reichen von schlecht bis sehr gut, je nach der Ausführungsart. Konstruktion und Wirtschaftlichkeit sind immer eng miteinander verbunden. Eine teure Konstruktion bedeutet jedoch nicht immer die beste Lösung. Ein Beispiel dafür ist die automatisierte Fassadensteuerung. Diese Maßnahme ist notwendig, um den klimatischen Einfluss nach innen am besten zu regeln. Wenn aber die Konstruktion selbst keine ideale Lösung darstellt, kann die Automation

lediglich eine Gebäudenachtkühlung gewährleisten. Die Ausführung von Doppelfassaden kostet etwa 400,00 bis 1500,00 Euro je m² Fassade mehr als gut wärmedämmte Einfachfassaden [5]. Daher sollen Doppelfassaden immer nach möglichst einfachen Konstruktionsprinzipien gebaut werden.

Eine hoch komplexe und regeltechnisch schwierig zu analysierende Doppelfassade im Einzelfall ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Sowohl der konstruktive Aufbau als auch die Strömungseffekte bei einer Doppelfassade sollen hier prinzipiell untersucht und verstanden werden. Doppelfassaden des Typ 1 sollten nur bedingt zur Ausführung kommen, da der Hauptvorteil einer Doppelfassade in der Nutzung der winterlichen Lüftungseffekte liegt und bei diesem Typ nur sehr geringfügig zur Heizenergie-senkung genutzt werden kann. (siehe Abbildung 32.) Typ 6, die Sonderkonstruktion, sollte auch bedingt eingesetzt werden, da die Strömung infolge der Rezirkulationen unerwartete negative Auswirkungen bei steigender Höhe haben kann. Typ 2 bis 5 können je nach Klimabedingungen sinnvoll eingesetzt werden.

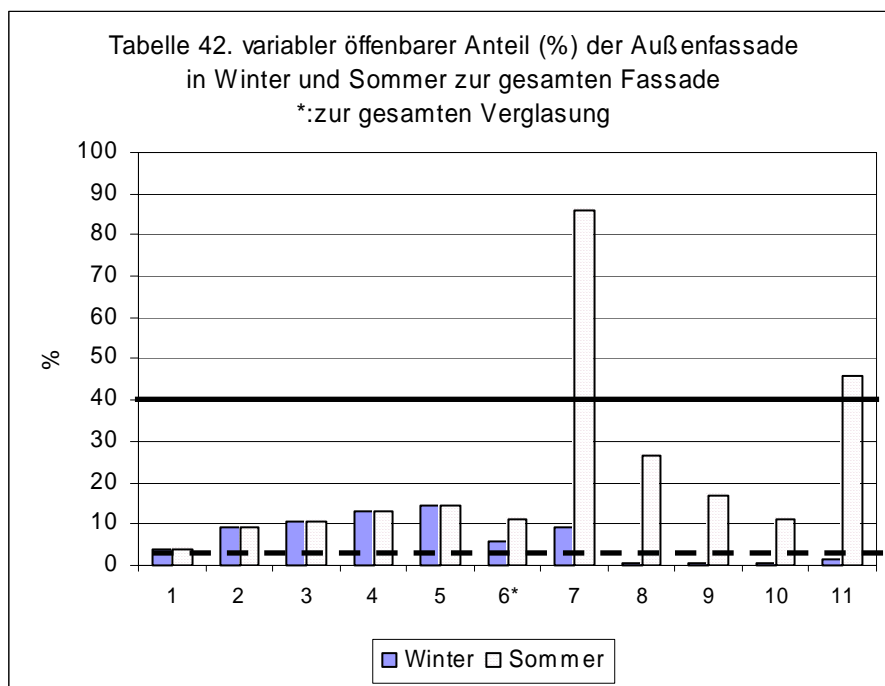


Tabelle 42 ist der Auszug von der Beispielanalyse im Kapitel 6. Die öffentbaren Anteile der Außenfassade bei allen untersuchten Doppelfassaden wurden nach Jahreszeiten (Winter und Sommer) prozentual betrachtet. Beispiel 1, 2, 3, 4 und 5 sind die Doppelfassade Typ1, die einen festen Öffnungsanteil der Außenfassade sowohl im Sommer als auch im Winter haben. Von 6 bis 11 können die Öffnungsanteile jahreszeitlich variabler werden. Eine gut funktionierende Doppelfassade sollte ihren Öffnungsanteil der Außenfassade im Winter max. unter 2% (zeigt die unten gestrichelte Linie.), und im Sommer min. über 40% (zeigt die oben durchgezogene Linie.) variieren können.

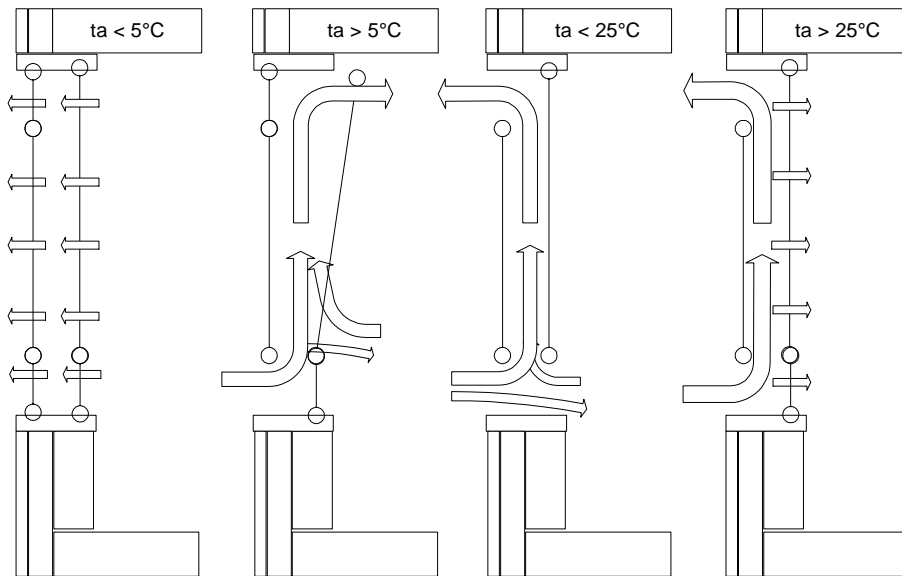


Abbildung 33: Doppelfassade mit variabler Einstellung

Ein weiterer Aspekt, der problematisch werden kann, ist der Einsatz einer Innenverglasung mit raumhohen Öffnungsflügeln, da im Winter hier u. U. Zugscheinungsgefahr besteht und der Einsatz zur sommerlichen Fensterlüftung durch Überhitzung des Fassadenzwischenraumes kritisch wird. Bereits in der sonnigen Übergangsjahreszeit wäre eine Fensterlüftung so nicht möglich. Um das Problem zu begrenzen und um die Fensterlüftungszeiten maximieren zu können, sollte das Innenfenster oben und unten getrennt ausgeführt werden. Durch die vertikal getrennten inneren Fenster werden verschiedene Öffnungsvariationen ermöglicht. Am besten sollten das untere Fenster und der Zuluft einlass der Außenfassade in etwa gleicher Höhe liegen. Im Winter öffnet sich nur das obere Innenfenster, und das obere Außenfenster bleibt zu, damit die Induktionseffekte (siehe Kapitel 5-3-3.) maximiert werden können. In der warmen Zeit bleibt nur das untere Innenfenster offen. Die beiden oben- und untenliegenden Außenfenster sollten ebenfalls ganz offen bleiben. Dann kann die Außenluft weitergehend ohne zusätzliche Erwärmung im Fassadenzwischenraum nach innen einströmen, während bei einer Fensterlüftung bei raumhohen Innenfenstern die im Fassadenzwischenraum erwärmte Luft in den Raum einströmen würde. Die Abbildung 34 zeigt eine mögliche Ausführung auf.

9.4 Allgemein gültiges Problem bei Hochhäusern mit Ganzglasfassaden – Grenzschichtenproblem

Unter dem Grenzschichtenproblem soll hier das Phänomen verstanden werden, dass die an der Fassade absorbierte und nach außen wieder abgegebene Wärme die Grenzschicht an der Gebäudeaußenseite aufheizt. Dies wurde bisher meist außer Acht gelassen. Das Problem tritt meistens bei Windstille auf. Die nach außen von der

Fassade abgegebenen Wärme steigt entlang der Fassaden nach oben. Über die Gebäudehöhe wird diese Grenzschicht dicker und zugleich steigt die Außentemperatur an der Fassadenoberfläche an. Diese Temperatur nimmt an windstillen Tagen mit starker Besonnung erheblich zu [64]. Aus diesem Grund wird eine Fensterlüftung beim oberen Geschoss zusätzlich noch erschwert. Bezogen auf dieses Problem, ergeben sich interessante Ergebnisse aus Kapitel 8-3-4. Dieses Grenzschichtenproblem kann bei der Doppelfassade und der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz verstärkt auftreten. Bei Doppelfassaden entsteht das Problem, weil die erwärmte Luft im Fassadenzwischenraum weiter an die Außenluft abgegeben wird. Bei einschaliger Fassade mit außenliegendem Sonnenschutz entsteht die Erwärmung im Bereich zwischen Glasscheibe und dem außenliegenden Sonnenschutz. Damit besteht dieses Problem sowohl bei der Doppelfassade als auch bei der einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz. Bei einer einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz dagegen ist die Wärmeabgabe nach außen am geringsten. Der Grund dafür liegt darin, dass die meiste Wärme nach innen eingelassen und absorbiert wird. Daher ist die Wärmeabgabe nach außen gering, während die interne Last steigt. Gleichwohl besteht dieses Problem, wenn die Fassade mit Innensonnenschutz eine gebäudehohe glatte gläserne Gebäudehülle hat, da die Wärme entlang der Gebäudehöhe gut nach oben strömt.

Bei Windstille, die im Sommer häufiger auftritt, kann sich das Grenzschichtenproblem bei einer Doppelfassade und einer einschaligen Fassade mit Außensonnenschutz im Vergleich zur einschaligen Fassade mit Innensonnenschutz sehr negativ auswirken. Die erste Maßnahme, um dies zu vermeiden, ist daher der Einsatz einer äußeren Verglasung mit hohem Reflektionsgrad, weil die Strahlung bei der Reflektion an der Fassade diffus an die Umgebung abgegeben wird. Auch ist eine Auskragung eine geeignete Maßnahme, um bei natürlicher Belüftung die Durchmischung der Außenluft zu fördern.

9.5 Zusammenfassung

In der Arbeit wurden die Auswirkungen von Glasfassaden bei hohen Verwaltungsgebäuden in der extremgemäßigten Klimazone untersucht. Die Einsatzmöglichkeiten von Doppelfassaden für diese extremgemäßigte Klimazone waren Schwerpunkt dieser Arbeit. Es konnte bewiesen werden, dass eine Doppelfassade eine ökologische und ökonomische Alternative zur einschaligen Fassade sein kann. Jedoch kann die Doppelfassade nicht als eine Maßnahme betrachtet werden, die die Klimaanlage ersetzen kann. Die Behaglichkeitszone, Temperatur von 20 bis 27 °C und Luftfeuchtigkeit 30 bis 60 %, kann in diesen Regionen allein mit den Maßnahmen einer Doppelfassade nicht eingehalten werden. Die meisten Gebäude

mit einer Doppelfassade in Deutschland haben dafür eine entsprechende RLT-Anlage, wie z. B. Konstantvolumenstromanlagen mit Deckenkühlung [60]. Der Einsatz einer Doppelfassade ist nur dann positiv zu bewerten, wenn niedrigere bzw. höhere Toleranzen der Zulufttemperatur von den Nutzern als komfortabel akzeptiert werden. Zum Beispiel ist bei einer Akzeptanz der Zulufttemperatur von 5 bis 27 °C die Fensterlüftung deutlich länger möglich als bei einem Bereich von 15 bis 25°C und die ursprünglichen Vorteile einer Doppelfassade nehmen zu. Die Zulufttemperatur, die bei der freien bzw. natürlichen Lüftung eine entscheidende Rolle spielt, wurde als mittlere Temperatur im Fassadenzwischenraum bei den hier durchgeführten Simulationen angenommen. Weil sich die Temperatur im Fassadenzwischenraum mit der Höhe ändert, wird die tatsächliche Zulufttemperatur in den Raum je nach Innenfensterausführung und dessen Einbauhöhe anders ausfallen. Dieser Unterschied wurde mit dem Programm Trnsys nicht berechnet.

Der Heizbedarf wird infolge der hohen internen Wärmelast bei heutigen Verwaltungsbauten bzw. nach ostasiatischen Arbeitsverhältnissen schon bei niedrigen Außentemperaturen gedeckt. Der Betrieb im Sommer ist grundsätzlich problematischer zu sehen als im Winter. Im Winter sollte trotzdem vermieden werden, dass die maximale Luftgeschwindigkeit 0,15 m/s überschreitet und die Temperatur im Bodenbereich 20 °C unterschreitet, da sonst Zugerscheinungen auftreten können. Im Sommer dagegen ist eine Fensterlüftung sowohl bei der Doppelfassade als auch bei einschaliger Fassade nur bedingt möglich, weil die Außenlufttemperatur mit hoher Luftfeuchtigkeit von mehr als 80 % tagsüber häufig deutlich über der Behaglichkeitszone liegt. Wenn das Gebäude klimatisiert werden soll, dann ist der Einsatz einer Doppelfassade auch sinnvoll, um den Kühlenergieverbrauch zu senken. Die Doppelfassade sollte dann eine ausreichende Hinterlüftung im Fassadenzwischenraum gewährleisten, damit die durch die Absorption erwärmte Wärme schnell abgeführt werden kann. Ob eine Doppelfassade schon bei den warmen sonnigen Tagen sowohl in der Übergangsjahreszeit als auch im Sommer eine Fensterlüftung ermöglicht oder nicht, hängt rein von der Fassadenausführung ab. Wenn die Konstruktion der Außenfassade zum großen Teil oder ganz geöffnet werden kann, dann wird die Fensterlüftung bei der Doppelfassade möglich.

Was aber an dieser Stelle z. B. insbesondere für Korea zu bedenken ist, ist die Tatsache, dass die besseren einschaligen Fassaden mit Außensonnenschutz und mit einer Gebäudenachtskühlung beim Hochhaus kaum in die Praxis umgesetzt werden. Damit wird der Einsatz einer Doppelfassade mit ihren energetischen Vorteilen und einer sicheren Gebäudenachtskühlungsmöglichkeit sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [1] Schuler M. ;
Ökologie, Ökonomie und Komfort, Die klima-aktive Fassade,
Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 1999.
- [2] Lloyd Jones David ;
Architektur und Ökologie, Zeitgenössische bioklimatische Bauten,
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1998.
- [3] Schramek E. (Hrsg.) ;
Taschenbuch für Heizung, Klima und Technik einschließlich Warmwasser und
Kältetechnik,
Oldenbourg, München, 1995.
- [4] Scheller H. ;
TWIN-Fassaden für die Zukunft Energieeinsparung und Schalldämmung bei
natürlicher Lüftung,
Innovative Fassadentechnologie,
Institut für Licht- und Bautechnik (ILB) an der Fachhochschule Köln, 1995.
- [5] Daniels K. ;
Technologie des ökologischen Bauens,
Birkhäuser, Berlin, 1999.
- [6] Yeang Ken ;
The Green Skyscraper,
Prestel Verlag, New York, 1999.
- [7] Kim H. ;
Ökologisch orientiertes Wohnen und Bauen in Korea // Tradition und Chance,
Dissertation, Universität Hannover, 1993.
- [8] Cornelson Redaktionsgesellschaft (Hrsg.) :
Seydlitz Weltatlas, Große Ausgabe,
Cornelson Verlag, Berlin, 1993.
- [9] The architectural institute of Korea (Hrsg.) :
Environmental Architectural Design,
Kimun Verlag , Seoul, 1997.
- [10] Klingele Martina ;
Architektur und Energie, Planungsgrundlage für Büro- und Verwaltungs-
bauten,
C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1994.
- [11] DIN 4108-3 ;
Wärmeschutz und Energieeinsparung im Gebäuden,
Teil3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen,
Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung,

- Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [12] DIN EN 410
Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen,
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1998
- [13] DIN EN 13363-1 ;
Sonnenschutzeinrichtung in Kombination mit Verglasungen –
Berechnungen der Solarstrahlung und Lichttransmissionsgrad –
Teil 1 : Vereinfachtes Verfahren
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1999
- [14] Schittich, Staib, Balkow, Schuler, Sobek ;
Glasbau Atlas,
Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, München, 1998.
- [15] Erhorn, Hans und Kluttig, Heike ;
Energiesparpotenzial im Verwaltungsgebäude zur Reduzierung der CO₂-Emissionen,
Sonderdruck aus gi-Gesundheits-Ingenieur, 1996.
- [16] Hausladen G. ;
Solare Doppelfassaden, Energetische und raumklimatische Auswirkungen,
Ki Luft- und Kältetechnik 11/1998.
- [17] VDI 2078 ;
Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume,
VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [18] Müller Helmut F.O. ;
Einsatz und Erprobung holographischoptischer Elemente für die Tageslichtlenkung, Innovative Fassadentechnologie,
Institut für Licht- und Bautechnik (ILB), Köln, 1995.
- [19] Lang Werner ;
Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Solarenergie,
Dissertation, TU-München, 2000.
- [20] Konradt, Oliver, und Güttler, Gerhard ;
Energieverbrauch und CO₂-Emissionen eines Bürogebäudes und Untersuchung der Wirtschaftlichkeit bei Einsatz von Solarenergie,
Bauphysik 3, 1997.
- [21] Nüßle, Fritz ;
Heizen und Kühlen mit abgehängten Decken,
Deutsche Bauzeitschrift 8, 1997

- [22] Rouvel L, Kolmetz S. ;
Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Rand-
bedingungen,
Gesundheits-Ingenieur, gi, Heft Nr. 2, 1997.
- [23] Fitzner K., Zeidler O. ;
Sanirev (Sanierung raumluftechnischer Anlagen mit hohem
Energieverbrauch), 2000
- [24] Ortmanns, Günter ;
Vakuum beschichtetes Low-emissive Glass vor dem Hintergrund der
deutschen und europäischen Bestrebungen zur Energieeinsparung in
Gebäude,
glas+rahmen 6, 1996.
- [25] Müller H. ;
Von der Aufgabenstellung zur Lösung, Die Klima-aktive Fassade,
Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 1999.
- [26] Blum, Compagno, Fitzner, Heusler, Hortmanns, Hosser, Müller, Nolte,
Schwarzkopf, Sedlacek, Thiel, Ziller ;
Doppelfassaden,
Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2001.
- [27] Zeidler O. ;
Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäude,
VDI Verlag, Berlin, 2001.
- [28] Schell H. ;
Twintface-Fassaden für die Zukunft, Innovative Fassadentechnologie,
Institut für Licht- und Bautechnik (ILB), Köln, 1995.
- [29] Kruppa Boris ;
Untersuchungsergebnisse der ProKlima-Felduntersuchung, Raumklima in
Bürohäusern,
21.internationaler Velta Kongress' 99, Tirol, 1999
- [30] Herausgeber Sophia und Stefan Behling ;
Glass, Konstruktion und Technologie in der Architektur,
Prestel, New York, 1999.
- [31] Daniels K. ;
Low-Tech, Light-Tech, High-Tech,
Birkhäuser, Berlin, 1998.
- [32] BMBF/FGK-Fachtagung, „Doppelfassaden in der TGA“,
Bonn, 1997.

- [33] Thiel D. ;
Doppelfassaden – ein Bestandteil energetisch optimierter und emissionsarmer Bürogebäude, Innovative Fassadentechnologie,
Institut für Licht- und Bautechnik (ILB), Köln, 1995.
- [34] Stoll J. ;
Doppelschalige Fassade in Hochhäusern, Tagungsband,
Doppelfassaden und Technische Gebäudeausrüstung,
Fachinstitut Gebäude-Klima e.V, 1997.
- [35] Oesterle, Lieb, Lutz, Heusler ;
Doppelschalige Fassaden, Ganzheitliche Planung,
Verlag Georg D.W. Callwey GmbH & Co, München, 1999.
- [36] Detzer R. ;
Die Gebäudefassade als Planungsinstrument,
CCI, Heft 5/1996.
- [37] Blumenberg J., Zöllner A. ;
Doppelfassadenkonzepte in der modernen TGA/HLK, Fassadepower nicht nur High-Tech-Tower,
CCI, Sonderveröffentlichung.
- [38] Nolte C. ;
Zum Lüftungsverhalten von Doppelfassaden,
VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [39] Doge K., Franzke U. ;
Zusammenwirkung von Außenklima, Doppelfassade und Raumklima,
Technik am Bau, 1/1998.
- [40] Hausladen G. ;
Doppelfassaden – Energetische und Raumklimatische Auswirkung,
Doppelfassaden und technische Gebäudeausrüstung,
Fachinstitut Gebäude-Klima e. V., Bietigheim-Bissingen, 1997.
- [41] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang,
Düsseldorf, 1994.
- [42] Definitionen der dimensionslosen Zahlen bei H. Herwig ;
Wärmeübertragung A – Z, Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte,
Springer, Berlin, 1999.
- [43] Blum H. ;
Das innovative Raumklimakonzept, Eine ganzheitliche, wirtschaftlich-ökologische Lösung für ein Bürohaus in der Innenstadt,
Technik am Bau, 5/1997.

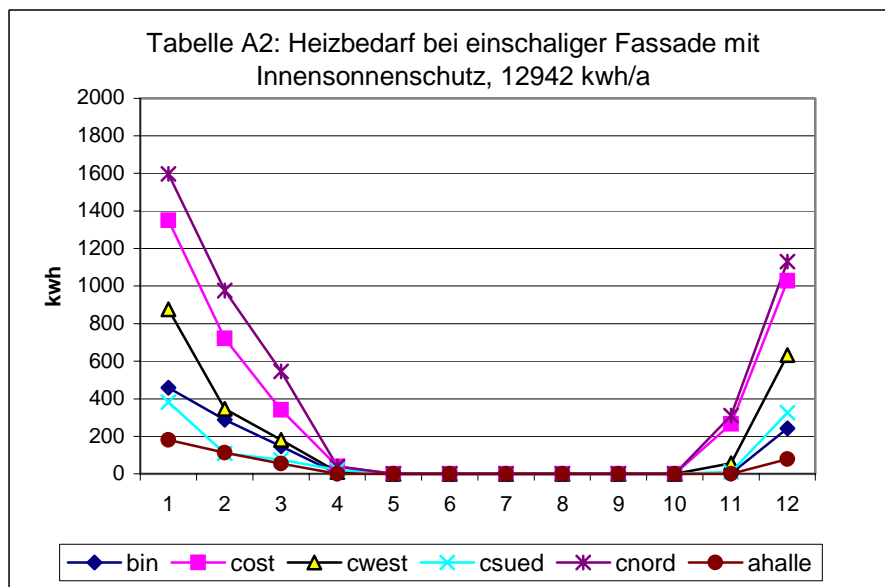
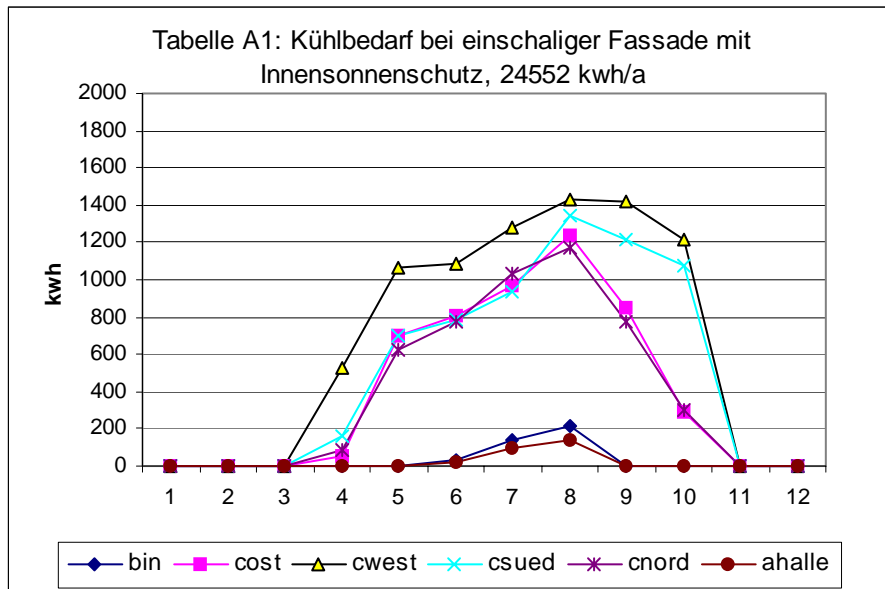
- [44] Ruscheweyh H. ;
Natürliche Be- und Entlüftung von Räumen durch Doppelfassaden,
Ki Luft- und Kältetechnik 9/1995.
- [45] Oesterle E., Fischer C., Lieb R. ;
Die doppelte Haut unter der Lupe,
CCI Heft 5/1997.
- [46] RWE-Hauptverwaltung, Baubeschreibung.
- [47] Davies C., Lambot I. ;
Modell eines ökologischen Hochhauses,
Birkhäuser, Berlin, 1997.
- [48] Die neue Commerzbank am Kaiserplatz in Frankfurt am Main,
Baubeschreibung.
- [49] Zukunft zum Anpassen, Erweiterung Victoria-Haus am Victoriaplatz,
- [50] Erweiterung Victoria-Haus, Düsseldorf, Daten zum Gebäude, 02.2000.
- [51] Sparkasse Pforzheim,
Glas, Architektur und Technik, Aug./Sep. 2001.
- [52] Lödl Thomas ;
Fassaden des debis-Gebäudes C1 in Berlin,
Glas, Architektur und Technik, Feb.1998.
- [53] Print Media Academy in Heidelberg,
Glas, Architektur und Technik, Zweite Haut aus Glas, 2/2001.
- [54] Oesterle, Lieb ;
Die doppelschalige Fassade des Düsseldorfer Stadttors,
Sonderdruck aus TAB – Technik am Bau, 7/97.
- [55] Herzog T. ;
Nachhaltige Höhe, Deutsche Messe AG Hannover Verwaltungsgebäude,
Prestel Verlag, München, 2000.
- [56] Hotel- und Bürogebäude Seestern in Düsseldorf,
Glas, Architektur und Technik, Zweite Haut aus Glas, 2/2001.
- [57] Sauerbruch Hutton Architekten ;
GSW Hauptverwaltung
Lars Müller Publishers, Berlin, Baden Switzland, 2000.
- [58] GSW Hauptverwaltung Berlin, Steckbrief.
- [59] ARAG 2000, Baubeschreibung.
- [60] Fitzner K. ;
heizbösch Symposium ,97 „Die Welt der Klimatechnik“.
- [61] Feist W., Loga T. ;
Verglasungsqualität – Einfluss auf Wärmebilanz und thermische Behaglichkeit
und Niedrigenergie- und Passivhäusern,
Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.

- [62] Oesterle E. ;
Neue Wege der Planung – Formen der Umsetzung, Die Klima-aktive Fassade,
Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 1999.
- [63] Fischer H.-M. ;
Lehrbuch der Bauphysik,
B. G. Teubner, Stuttgart, 1997.
- [64] Marek R. ;
Design und Optimierung doppelschaliger Fassaden (Teil2),
Technik am Bau, 12/2001.

Anhang

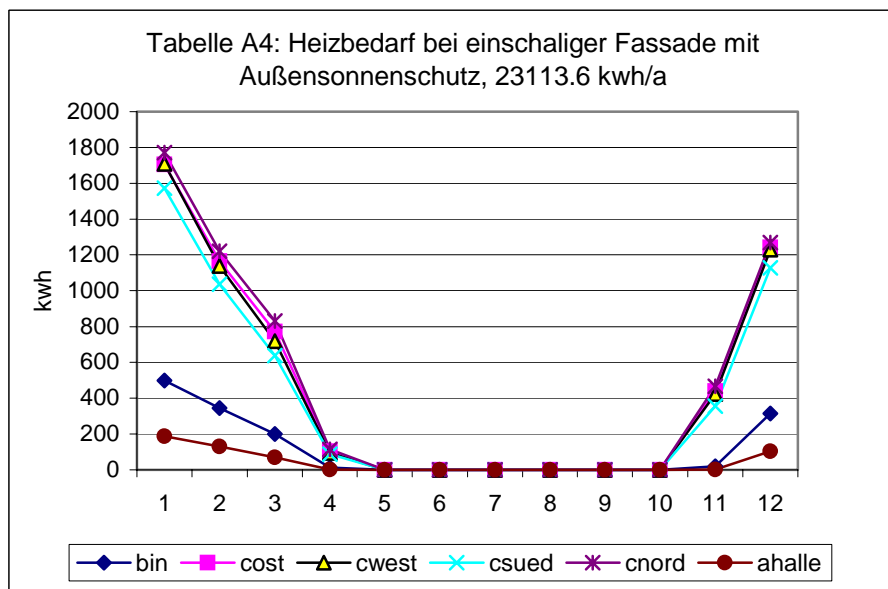
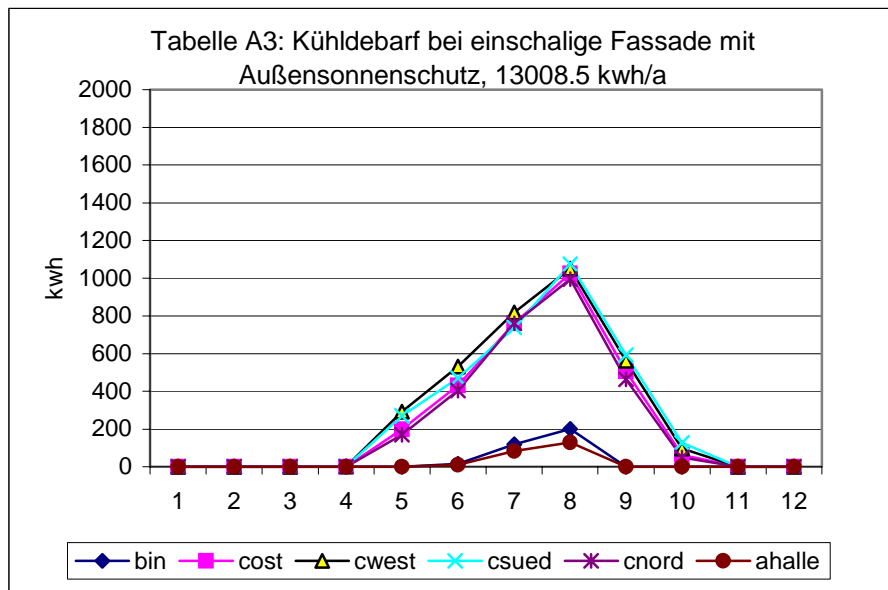
A Vergleich des Heiz- und Kühlbedarfes

A.1 Einschalige Fassade mit Innensonnenschutz

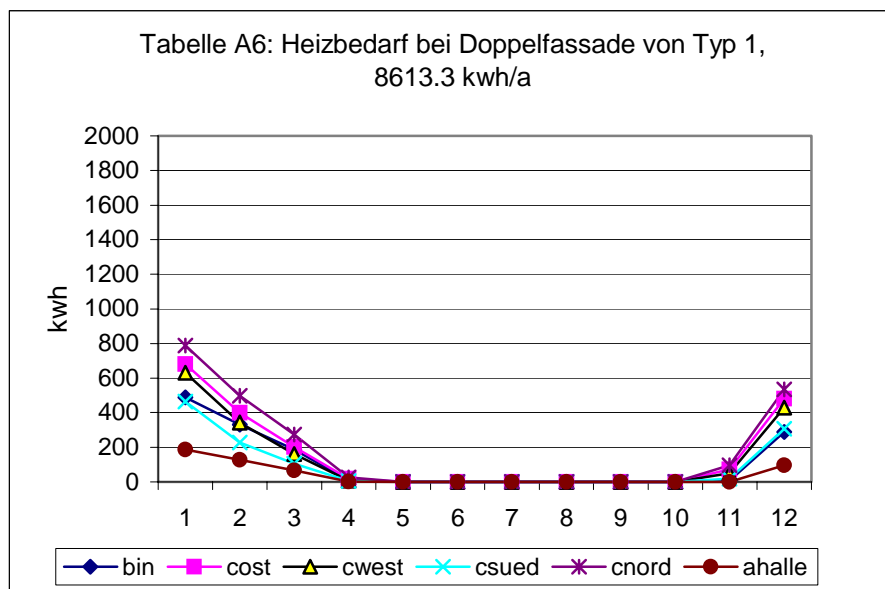
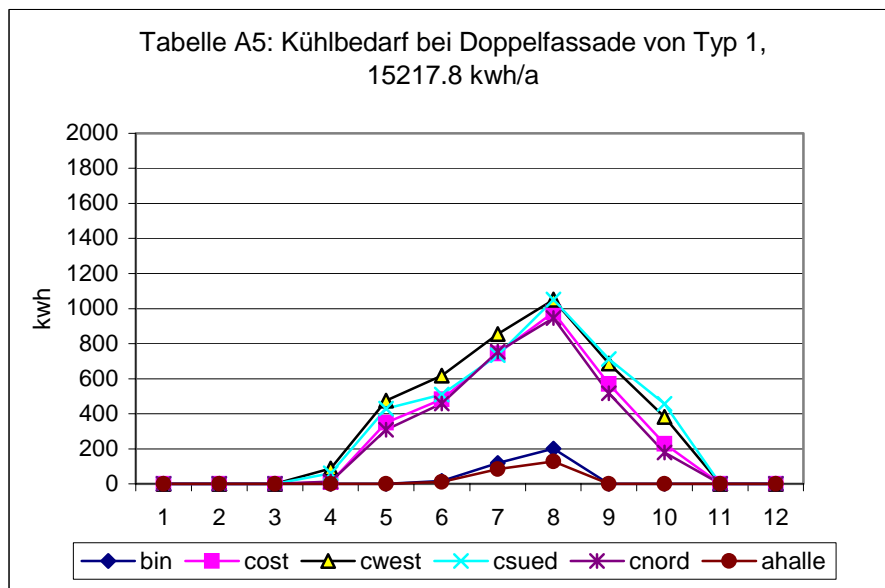


*Die Abkürzungen sind in Abbildung 28 auf Seite 84 beschrieben.

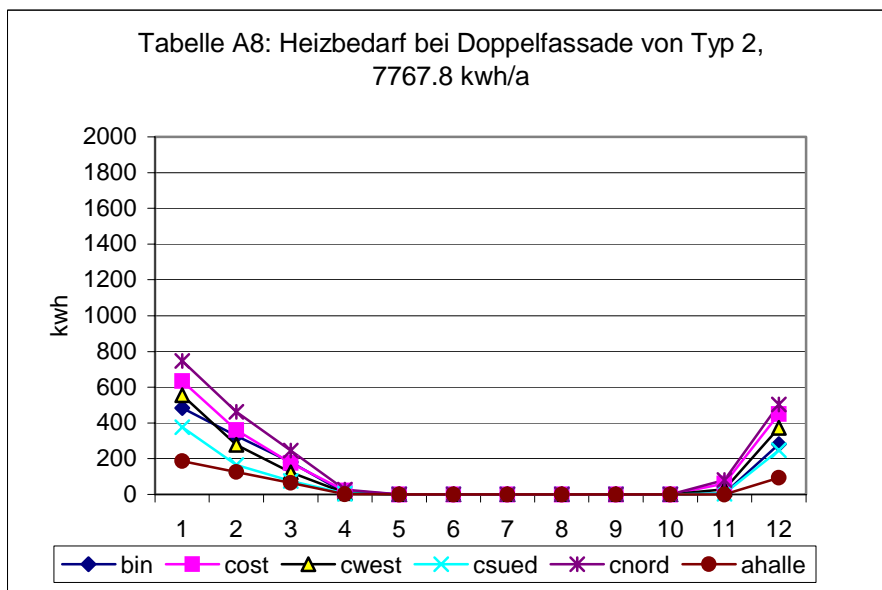
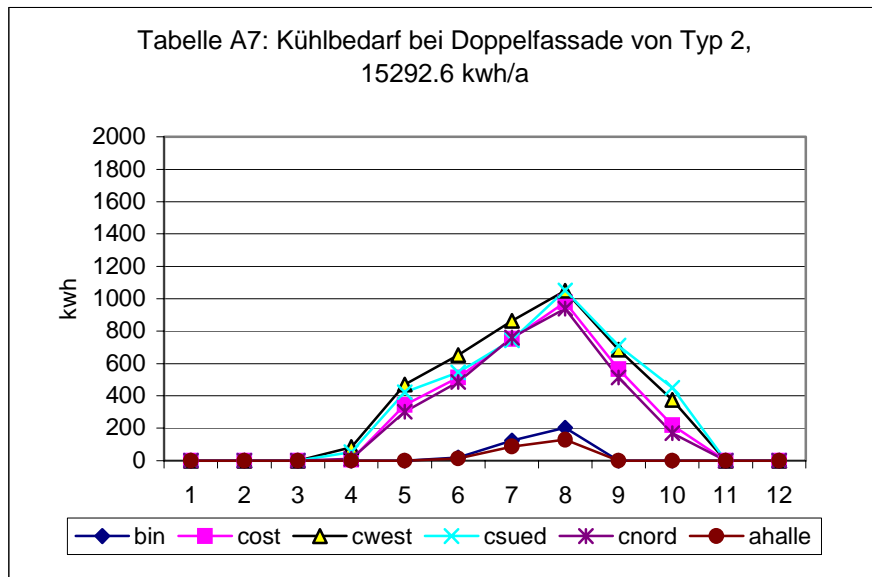
A.2 Einschalige Fassade mit Außensonnenschutz



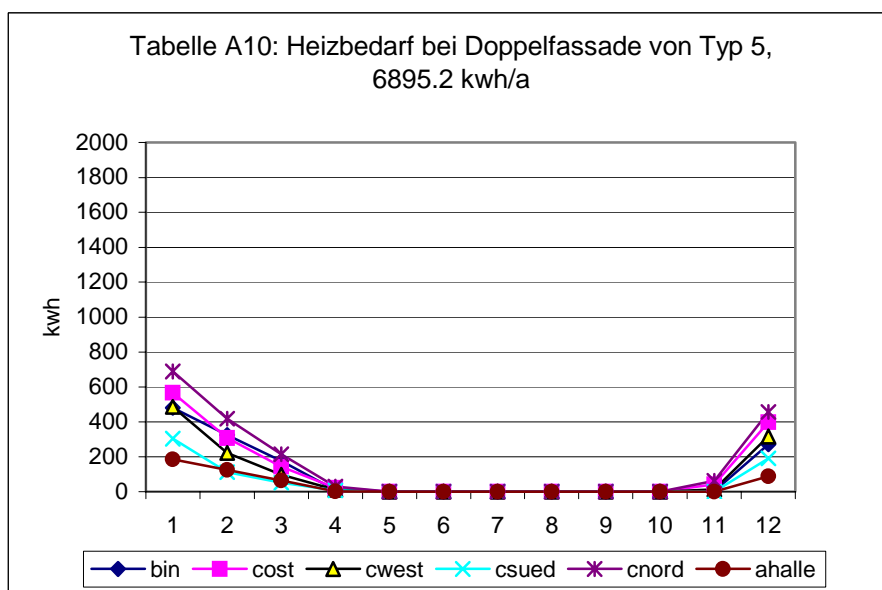
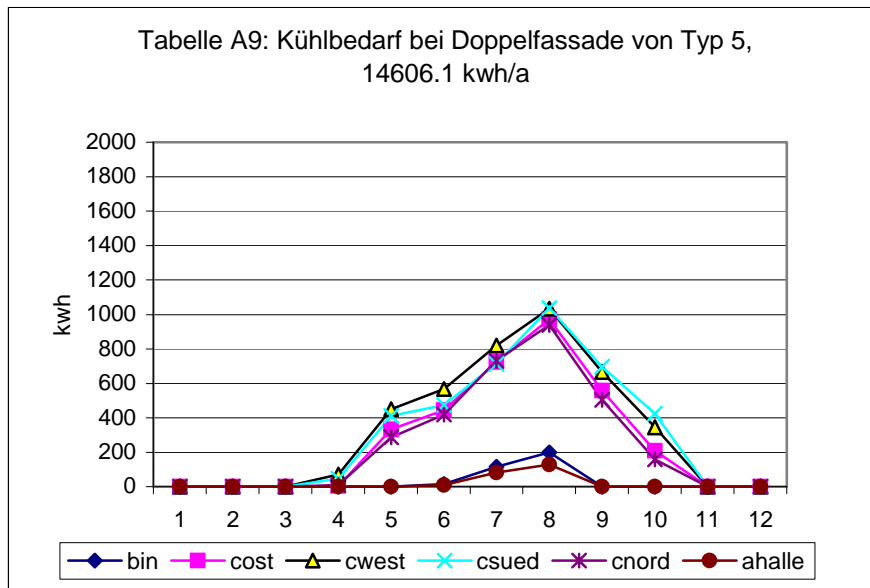
A.3 Doppelfassade mit permanenter Hinterlüftung mit festen Öffnungsschlitzfen an der Außenfassade (Typ 1)



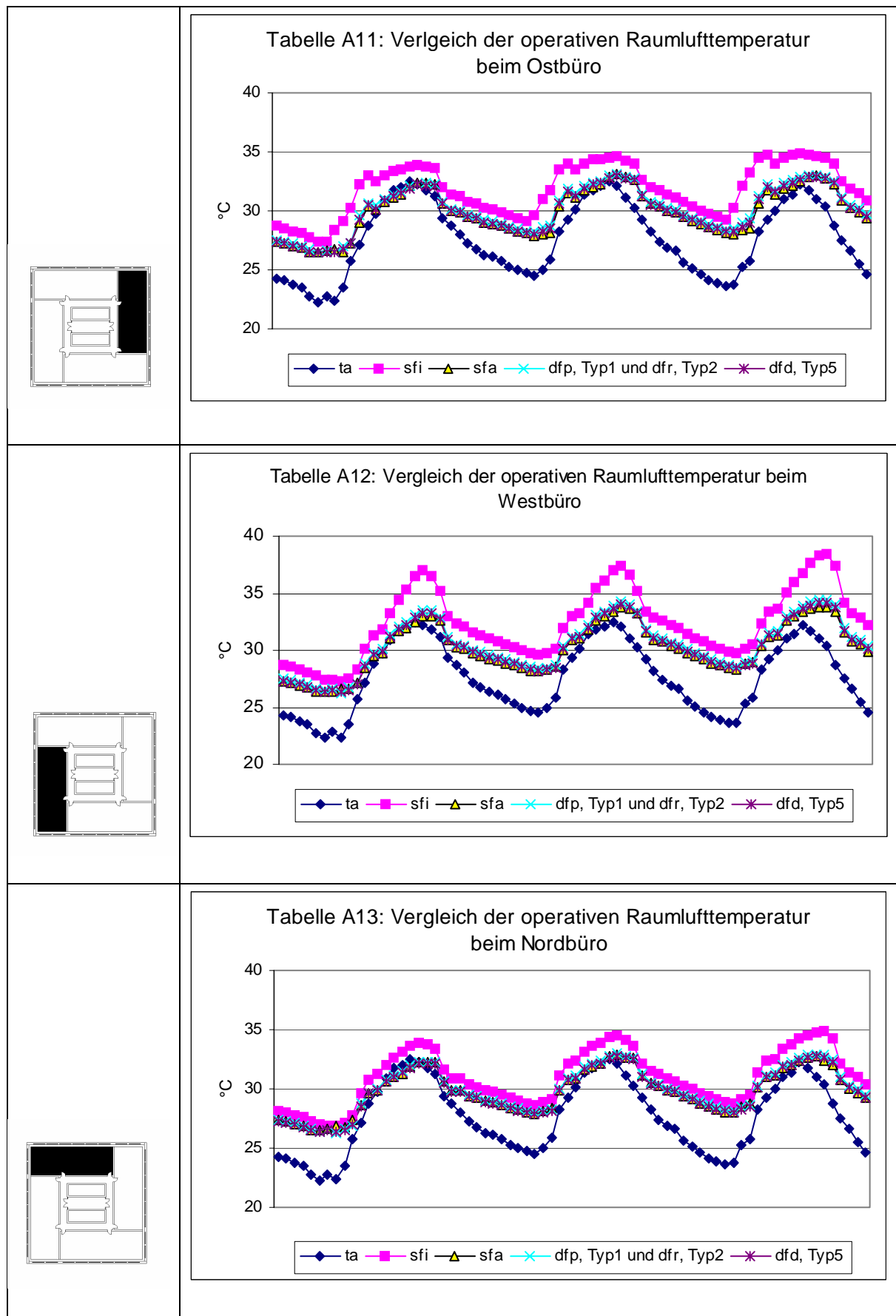
A.4 Doppelfassade mit z. T. regulierbarer Hinterlüftung mit geringfügig öffnbarer Außenfassade (Typ 2)



A.5 Doppelfassade mit (dicht) regulierbarer Hinterlüftung mit großflächig öffnbarer Außenfassade (Typ 5)

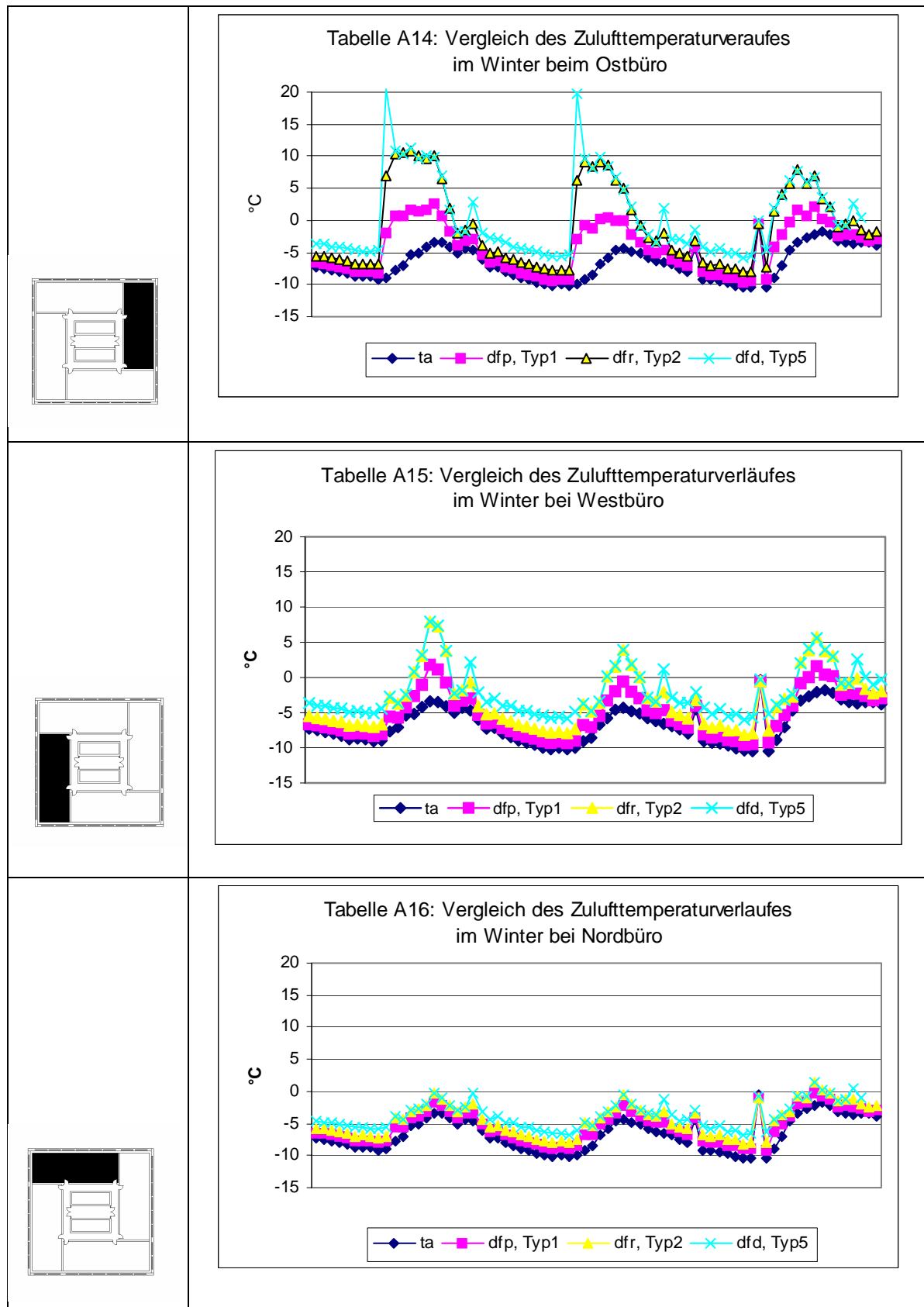


B Raumlufthtemperaturverlauf ohne Kühlung im Sommer



*Die Abkürzungen sind auf Seite 80 beschrieben.

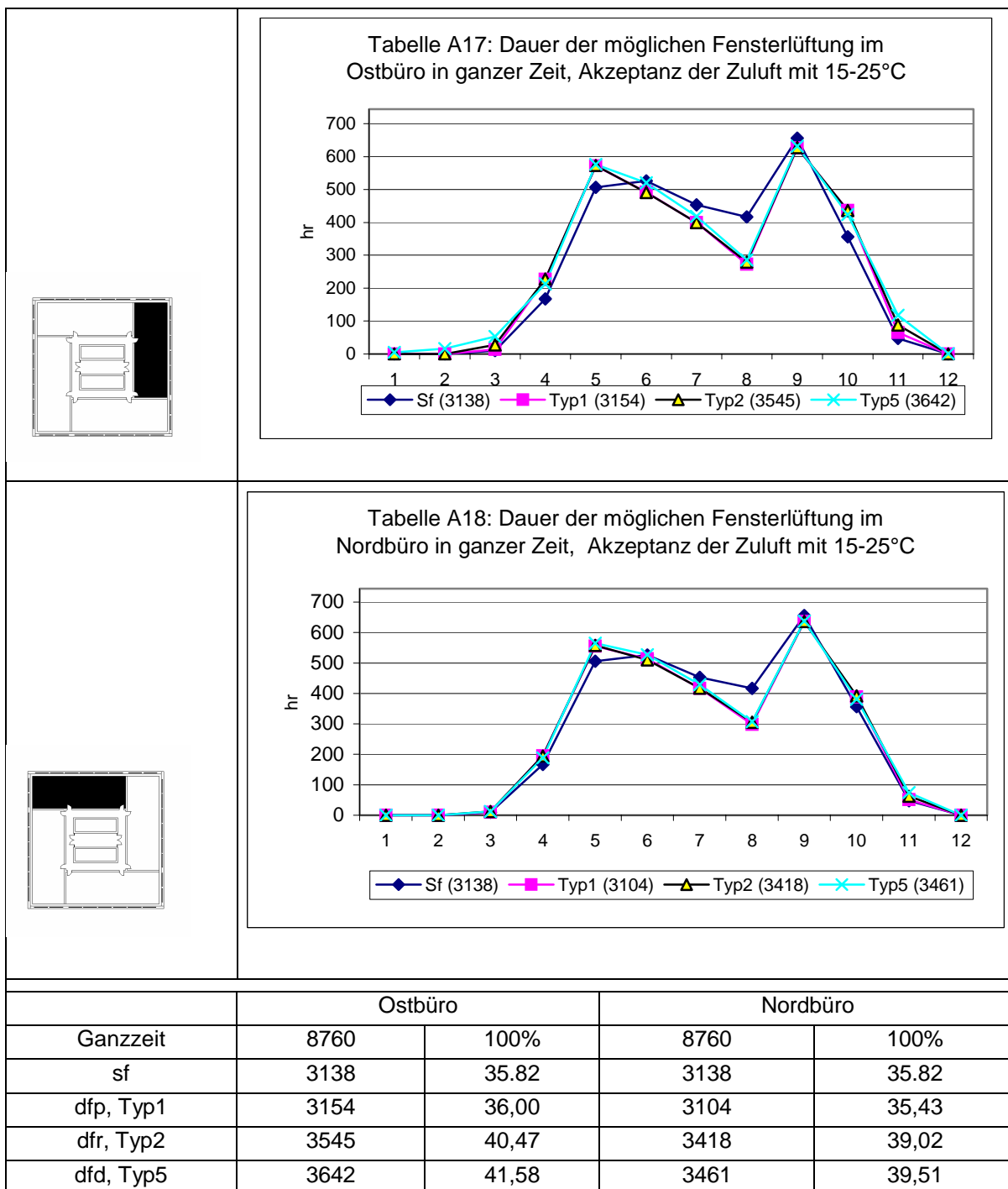
C Zulufttemperaturverlauf im Winter



D Dauer der möglichen Fensterlüftung bei Ost- und Nordbüro

D.1 Zulufttemperatur zwischen 15-25

in ganzer Zeit (8760 h)



Anhang

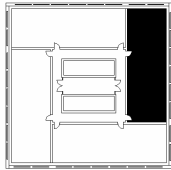


Tabelle A19: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C

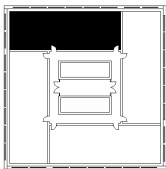
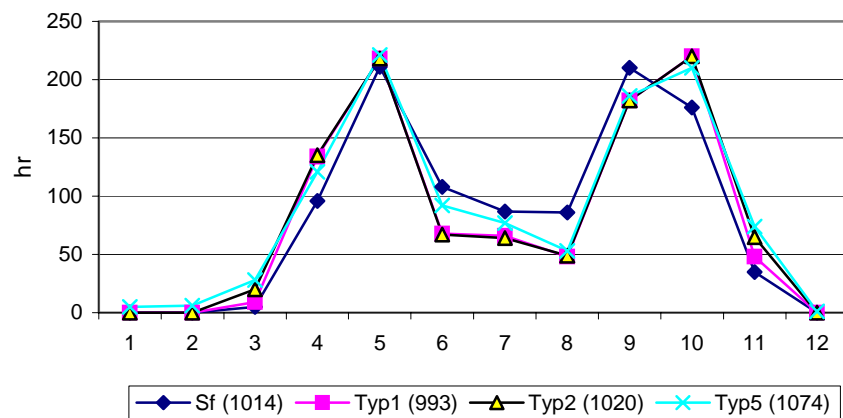
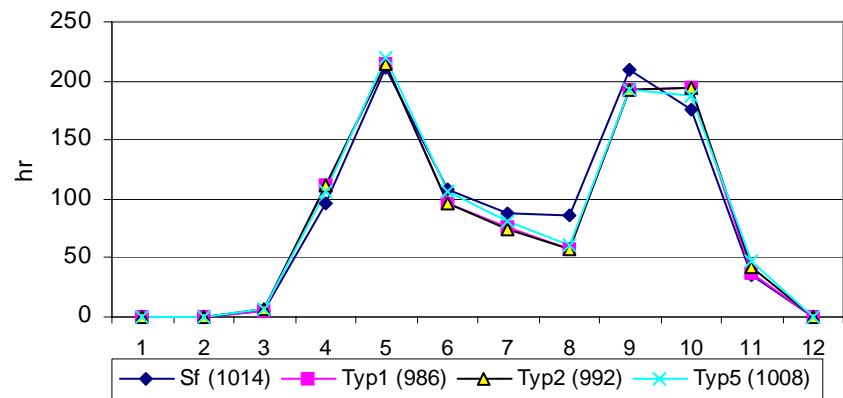
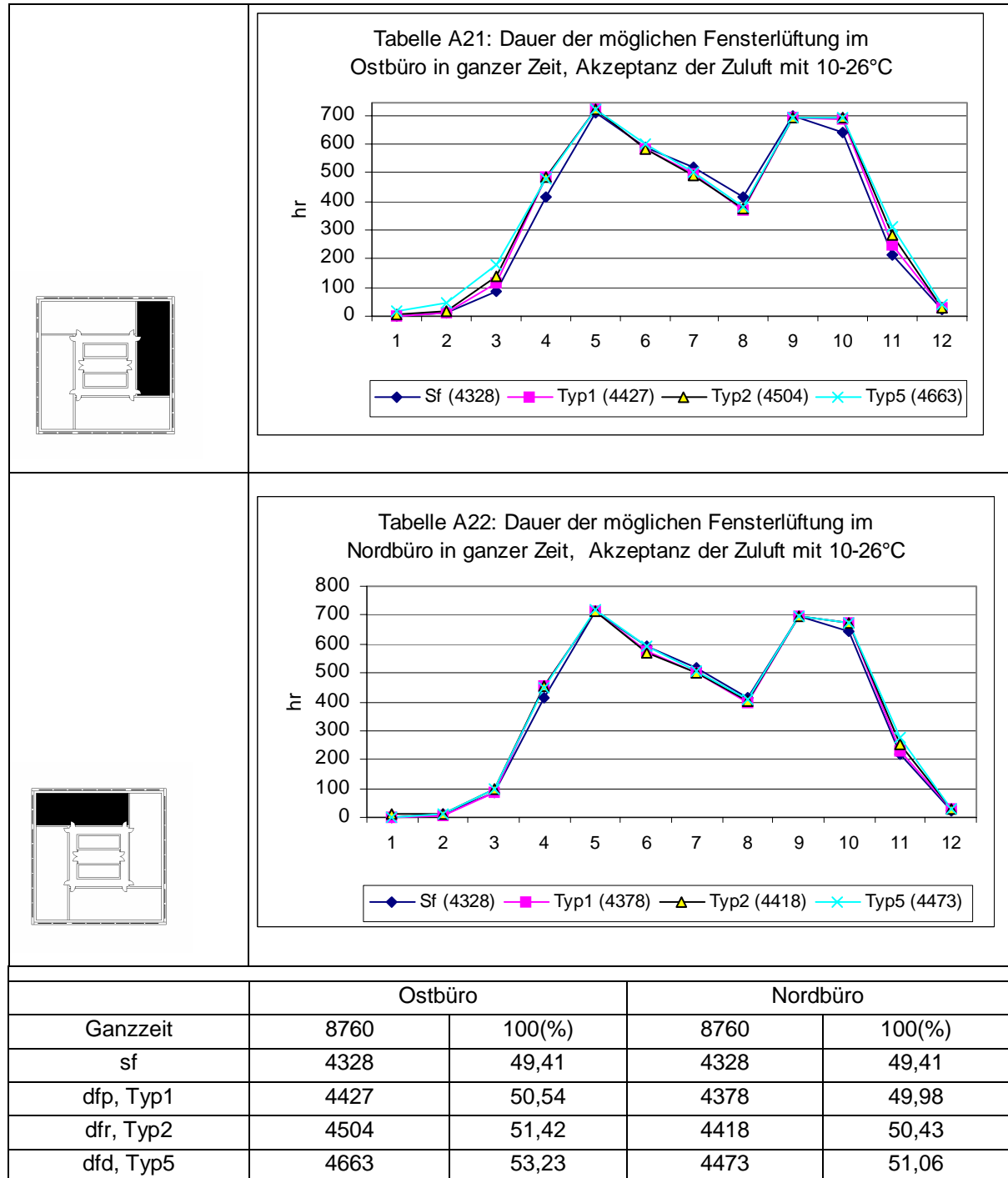


Tabelle A20: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 15-25°C

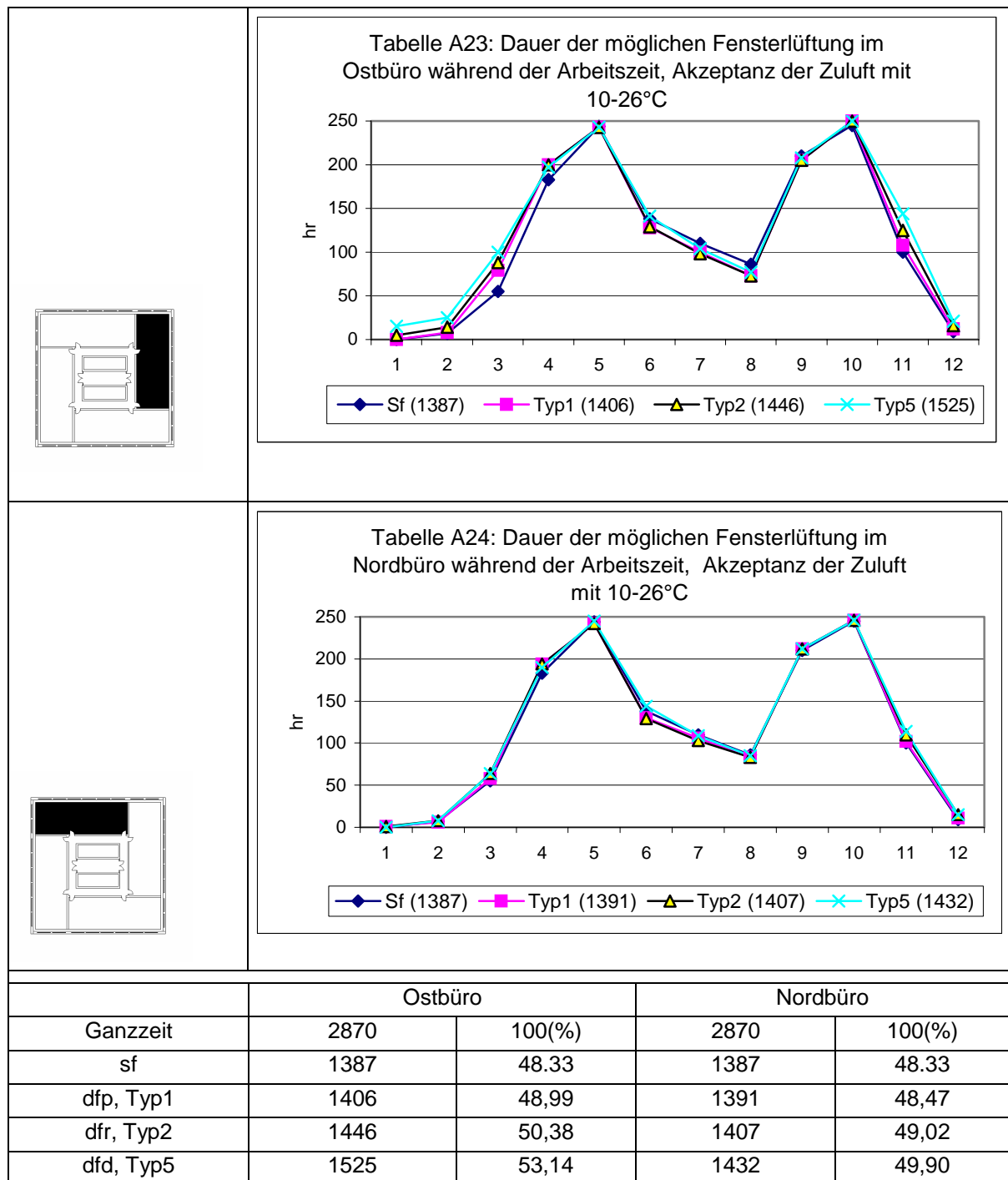


	Ostbüro		Nordbüro	
Ganzzeit	2870	100 (%)	2870	100 (%)
sf	1014	35,33	1014	35,33
dfr, Typ1	993	34,60	986	34,36
dfr, Typ2	1020	35,54	992	34,56
dfr, Typ5	1074	37,42	1008	35,12

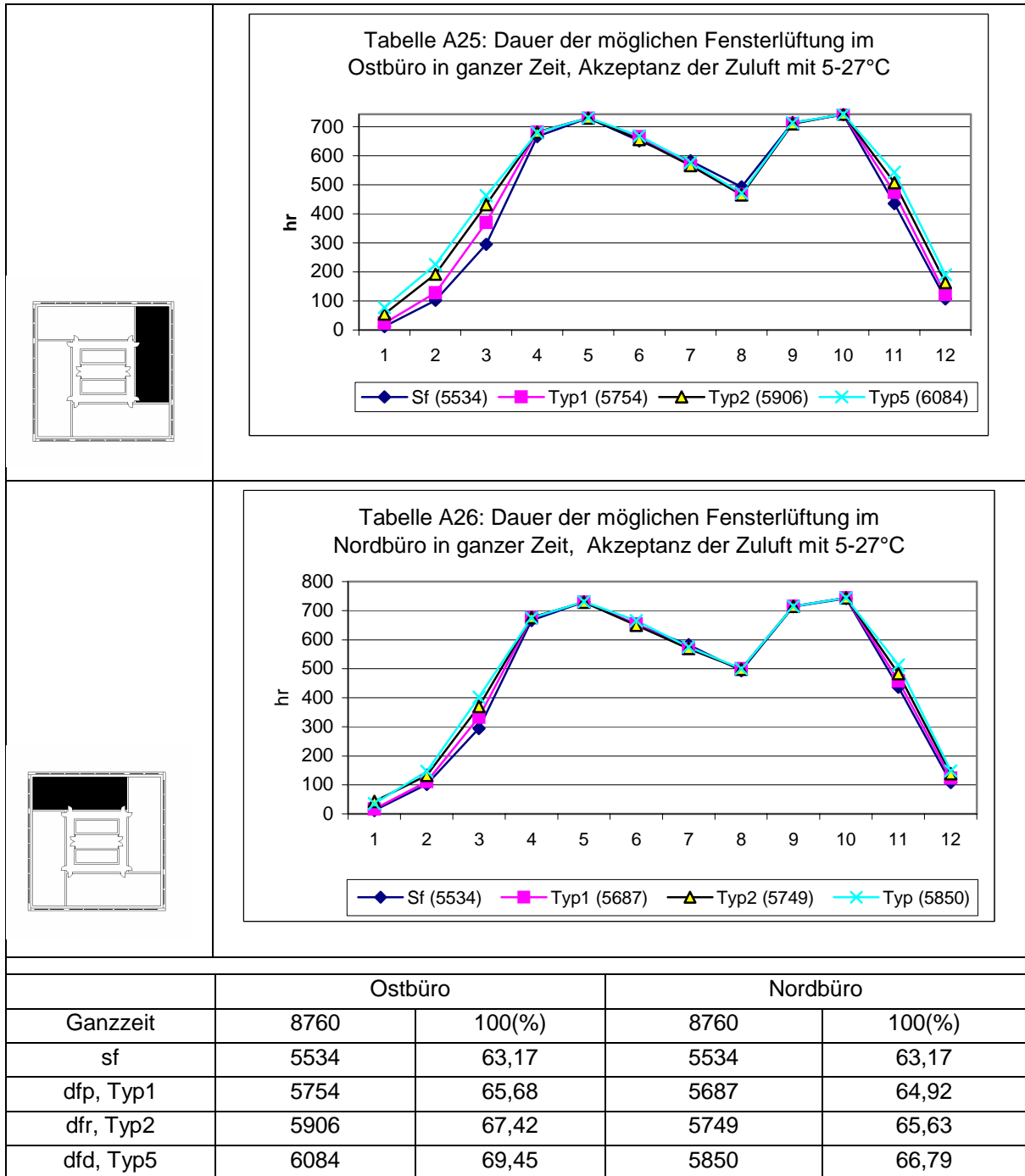
D.2 Zulufttemperatur zwischen 10-26



Anhang



D.3 Zulufttemperatur zwischen 5-27



Anhang

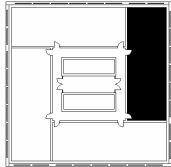


Tabelle A27: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Ostbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C

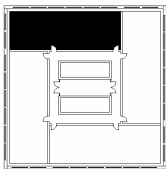
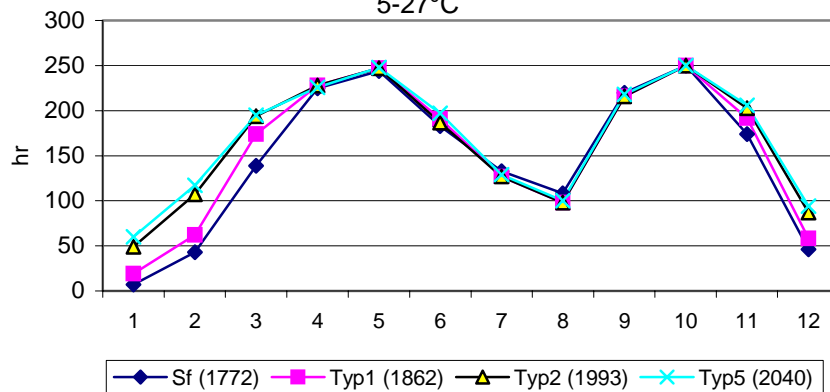
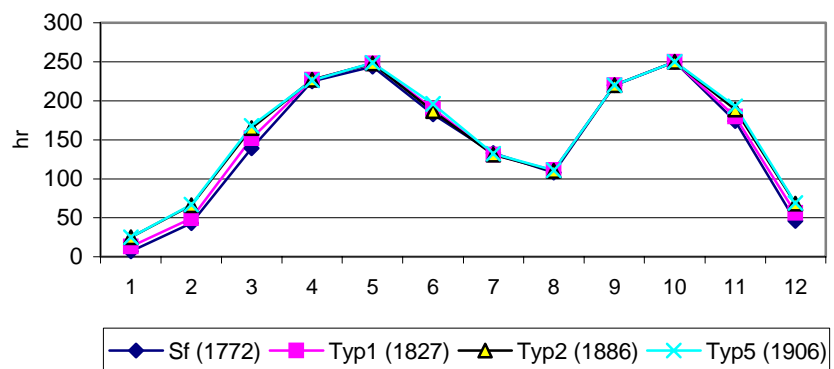


Tabelle A28: Dauer der möglichen Fensterlüftung im Nordbüro während der Arbeitszeit, Akzeptanz der Zuluft mit 5-27°C



	Ostbüro		Nordbüro	
Ganzzeit	2870	100 (%)	2870	100 (%)
sf	1772	61,72	1772	61,72
dfp, Typ1	1862	64,88	1827	63,66
dfr, Typ2	1993	69,44	1886	65,71
dfd, Typ5	2040	71,08	1906	66,41